



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SNÍMÁNÍ OBRAZU S VYSOKÝM DYNAMICKÝM ROZSAHEM

HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BcA. Petr Kupka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Slanina, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Elektronika a sdělovací technika

Ústav radioelektroniky

Student: BcA. Petr Kupka

ID: 89136

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základní principy snímání statických snímků a videosekvencí s vysokým dynamickým rozsahem (high dynamic range - HDR). Vytvořte laboratorní pracoviště, které bude obsahovat umělou scénu s velkou dynamickou osvětlením, na které bude možné experimentovat s HDR fotografií.

V programovém prostředí Matlab vytvořte program, který spojí několik snímků pořízených s rozdílnou expozicí (bracketing) do jediného HDR snímku. Program by měl umožňovat také tzv. „tone mapping“, tedy převod do takového formátu, který je možné zobrazit na běžných zobrazovačích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BOČÍK, A. Velká kniha HDR fotografie. Brno: Computer Press, 2013.

[2] ČADÍK, M. Evaluation of Tone Mapping Operators. [Online] [Cit. 14. května 2015] Dostupné na [www: http://cadik.posvete.cz/tmo/](http://cadik.posvete.cz/tmo/).

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 30. 5. 2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Slanina, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá základními principy zvyšování dynamického rozsahu u digitální fotografie. Práce dále hledá, jaké metody se využívají pro vytvoření fotografie s vysokým dynamickým rozsahem (HDR) a prozkoumává metody pro kompresi HDR obrazu pro zobrazení na zařízeních s nízkým dynamickým rozsahem (LDR). Implementace algoritmů pro tónové mapování je provedena v programu HDR_lab vytvořena v prostředí Matlab.

KLÍČOVÁ SLOVA

vysoký dynamický rozsah, kontrast, vícenásobná expozice, automatický expoziční bracketing, metoda skládání snímků, radianční mapa, adaptivní logaritmické mapování, gradientní doménová komprese, bilaterální filtrování, tonové mapování, Matlab

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with basic principles of increasing the dynamic range of digital photography. The work also looks for the methods that are used to create high dynamic range (HDR) photography, and examines methods for compressing HDR images for low dynamic range (LDR) imaging. Implemented algorithms for tone mapping are performed in HDR_lab program created in Matlab.

KEYWORDS

high dynamic range, contrast, multiple exposure, auto exposure bracketing, the method of folding frames, radiance map, adaptive logarithmic mapping, gradient domain high dynamic range compression, bilateral filtering, tone mapping, Matlab

KUPKA, P. *Snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 58 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Slanina, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Martinu Slaninovi, Ph.D. za rady, pomoc a usměrňování při zpracování bakalářské práce. Děkuji také Mgr. Sabině Spáčilové za podporu a za pomoc při gramatické kontrole práce.

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Fotografie s vysokým dynamickým rozsahem	2
1.1 Využití snímků s rozdílnou expozicí	3
1.2 Vytvoření radianční mapy z křivek odezvy fotoaparátu.....	5
1.3 Formáty HDR (RGBE, OpenEXR)[19].....	10
2 Konverzní techniky	12
2.1 Zobrazení snímků s vysokým dynamickým rozsahem na běžných zobrazovačích	13
2.2 Algoritmy pro zpracování radianční mapy	13
2.3 Algoritmy pracující s globálními operátory.....	16
2.3.1 Jednoduché globální operátory logaritmus, odmocnina a optimalizace	16
2.3.2 Reinhardova metoda mapování tónů. [35].....	16
2.3.3 Adaptivní logaritmické mapování metody Drago [12].....	20
2.4 Lokální operátory.....	21
2.4.1 Metoda Fattal (gradientní doménová komprese) [16]	21
2.4.2 Metoda Durand (bilaterální filtrování) [13].....	23
2.4.3 Reinhardova lokální metoda [35].	25
3 Implementace	26
3.1 Koncepce pracoviště	26
3.1.1 qDslrDashboard [33].....	27
3.1.2 Matlab [27].	29
3.2 Struktura vytvořeného programu HDR_lab.....	31
3.3 Popis funkce programu	32
3.3.1 Načtení fotografií do HDR_lab.....	32
3.3.2 Skládání radianční mapy metodou Debevec & Malik	34
3.3.3 Využití globálních a lokálních operátorů.....	37
3.3.4 Práce se souborem	43

3.4	Výsledky použitých postupů.....	44
4	Závěr	51
	Literatura	52
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	56
A	program HDR_lab	59
A.1	Obsah CD.....	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Fotografie s rozdílnou expozicí	3
Obrázek 1.2	Váhová funkce Hat použitá v metodě Debevec a Malik	7
Obrázek 1.3	Křivky odezvy RGB kanálů.....	9
Obrázek 1.4	Zobrazení radianční mapy, červená zobrazuje místa s maximálním jasnem a tmavě modrá místa zobrazují místa s nejnižším jasnem.	10
Obrázek 1.5	32 bitů na pixel v RGBE kódování [19].	10
Obrázek 1.6	Bitové kódování pro OpenEXR Half [30]	11
Obrázek 2.1	Snímky konvertované z HDR na běžný dynamický rozsah s využitím rozdílných algoritmů. Převzato z [17].	14
Obrázek 2.2	Mapování zón od černé (zóna 0) po bílou (zóna X), pokud je rozsah větší nebo rovno 11 zónám. Převzato z [35].	17
Obrázek 2.3	Mapování vstupního jasu pro zobrazení jasu při různých hodnotách m . Převzato z [15].	19
Obrázek 2.4	Vlastnost parametru b na výsledný jas. Převzato z [12].	20
Obrázek 2.5	(a) HDR scanline s dynamickým rozsahem 2415:1. (b) $H(x) = \log(\text{scanline})$. (c) Derivace $H'(x)$. (d) Utlumení derivace $G(x)$. (e) Rekonstrukce $I(x)$, podle rovnice 2.23. (f) LDR scanline $\exp(I(x))$ s novým DR 7,5:1. Převzato z [16].	21
Obrázek 2.6	První obrázek zleva je vstup, druhý je prostorové jádro filtru f , prostřední je funkce g v oblasti intenzity pro centrální pixel, druhý zprava je váha $f * g$ pro centrální pixel a poslední je výstup po bilaterálním filtrování. Převzato z [13].	25
Obrázek 3.1	Pracoviště s umělým osvětlením.....	26
Obrázek 3.2	Fotoaparát Nikon D3200 se setovým objektivem 18 – 55 mm.	27
Obrázek 3.3	1 – připojení pomocí USB kabelu k počítači. Převzato z [33].	28
Obrázek 3.4	Nastavení bracketingu programu qDslrDashboard. Převzato z [33].	28
Obrázek 3.5	Živý náhled programu qDslrDashboard. Převzato z [33].	29
Obrázek 3.6	Grafické rozhraní GUI pro tvorbu aplikací programu MATLAB	30
Obrázek 3.7	Vývojový diagram programu HDR_lab	31
Obrázek 3.8	1. krok programu HDR-lab – načtení fotografií	32
Obrázek 3.9	Plocha pro zobrazování výsledků programu HDR-lab	33
Obrázek 3.10	Změna velikosti s informací o velikosti upravených snímků	34
Obrázek 3.11	Zobrazené histogramy v programu HDR-lab zobrazených snímků.	34
Obrázek 3.12	2. krok programu HDR-lab – Rekonstrukce křivek odezvy	34

Obrázek 3.13	Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 20	35
Obrázek 3.14	Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 10	35
Obrázek 3.15	Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 1	36
Obrázek 3.16	3. krok programu HDR_lab – Rekonstrukce radianční mapy	36
Obrázek 3.17	4. krok programu HDR_lab Globální a Lokální metody	37
Obrázek 3.18	Použití logaritmizace na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy	38
Obrázek 3.19	Použití odmocnění na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy ...	38
Obrázek 3.20	Použití úpravy rozsahu na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy	38
Obrázek 3.21	Použití Optimalizace na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy	39
Obrázek 3.22	Použití Reinhardova globálního operátoru na jeden řádek červeného kanálu jasové mapy.....	39
Obrázek 3.23	Použití operátoru Drago na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.....	40
Obrázek 3.24	Použití korekce gamma na jeden řádek červeného kanálu jasové mapy. Vlevo je nastavena hodnota gamma = 1,125, vpravo je nastavena na hodnotu gamma = 2,2.	40
Obrázek 3.25	Použití operátoru Fattal na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.....	41
Obrázek 3.26	Jeden řádek radianční mapy červeného kanálu rozdělený pomocí Bilaterálního filtrování na dvě vrstvy. Vlevo základní vrstva a vpravo vrstva detailů.....	41
Obrázek 3.27	Vlevo zobrazena základní vrstva. Vpravo zobrazena vrstva detailů.	42
Obrázek 3.28	Použití operátoru Durand na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.....	42
Obrázek 3.29	Použití Metody Reinhard Local na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.....	43
3.30	Načtení a uložení HDR radianční mapy, uložení obrázků a Reset.....	43
Obrázek 3.31	Obrázky s rozdílnou expozicí převzaty ze stránek http://cadik.posvete.cz/tmo/ [9].	44
Obrázek 3.32	Křivky odezvy RGB pro vstupní snímky při použití hladkost = 20.	44
Obrázek 3.33	Radianční mapa vytvořena z vstupních snímků	45
Obrázek 3.34	Globální metoda pomocí logaritmizace.....	45
Obrázek 3.35	Globální metoda pomocí druhé odmocniny.....	46
Obrázek 3.36	Globální metoda změny rozsahu.....	46
Obrázek 3.37	Globální metoda Optimalizace	47
Obrázek 3.38	Globální metoda Reinhard global	47

Obrázek 3.39	Adaptivní logaritmické mapování Drago	48
Obrázek 3.40	Lokální metoda Fattal	48
Obrázek 3.41	Lokální metoda Durand	49
Obrázek 3.42	Základní vrstva a vrstva detailů metody Durand	49
Obrázek 3.43	Metoda Reinhard local.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1	Ilustrativní hodnoty snímaných scén a snímacích čipů [7].....	2
Tabulka 1.2	Váhové funkce pro rekonstrukci HDR.	6
Tabulka 2.1	Tabulka konverzních technik [4]	12

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá technikami pro zvyšování dynamického rozsahu fotografií pořízených za pomoci digitálního fotoaparátu. Běžné digitální fotoaparáty mají poměrně nízký dynamický rozsah - člověk je schopen vnímat daleko větší rozsah intenzit osvětlení než dokážou klasické fotoaparáty. Viditelný rozsah intenzit osvětlení lidského zraku se ovšem může měnit podle situace. Pokud člověk vstoupí z prostoru s vysokou intenzitou osvětlení do prostoru s nízkou intenzitou osvětlení lidské oči se přizpůsobují na změnu, až jsou schopny rozpoznat i velmi nízké intenzity osvětlení. Fotoaparát se musí pro každou danou jasovou situaci správně nastavit.

V situacích, kdy dochází ke snímání prostoru s přímým výhledem na zdroje záření, nebo na plně osvětlené objekty, může kontrastní poměr dosáhnout hodnot 1:80 000 nebo i více. Běžné digitální čipy mají kontrastní poměr 1:32 až 1:360. Je tedy zřejmé, že běžný digitální čip nemůže pokrýt takový dynamický rozsah. Pro kompenzaci se využívá vytvoření radianční mapy s vysokým dynamickým rozsahem složené z několika digitálních fotografií s rozdílnou expozicí. Tímto způsobem se pokryje daleko větší dynamický rozsah snímané scény. Problém nastává při zpětném zobrazení HDR snímku na běžném zobrazovači. Využívá se různých metod Tone-mappingu nebo-li mapování tonality k přizpůsobení dynamického rozsahu výsledného zařízení.

První část této bakalářské práce se zabývá vytvořením požadovaných snímků s rozdílnou expozicí a vytvořením radianční mapy s vysokým dynamickým rozsahem za pomoci křivek odezvy využitého digitálního fotoaparátu. Pro potřeby uložení radianční mapy jsou popsány metody k převodu do RGBE formátu *.hdr a OpenEXR. Metody pro konverzi HDR fotografie jsou popsány v další kapitole. Ta se zabývá metodami využití jednoduchých operátorů, metodou Reinhard Global a Local, metodou Drago, Fattal (gradientní doménová komprese) a metodou Durand (bilaterální filtrování).

V kapitole 3 je popsána realizace laboratorního pracoviště a implementace jednotlivých algoritmů do programového prostředí Matlab. K snímání fotografií je využit fotoaparát Nikon D3200 připojený k počítači pomocí USB a programu qDslrDashboard. Samotná tvorba HDR fotografie a následná konverze je provedena v programu HDR_lab, který byl vytvořen za pomoci programu Matlab.

1 FOTOGRAFIE S VYSOKÝM DYNAMICKÝM ROZSAHEM

Lidské oko je schopno rozlišit kontrast v rozsahu 1 : 10 000 a zároveň vnímat až 10 000 barevných odstínů. Postupně dokáže zvládnout kontrast až 1 : 1 000 000 000 [6]. Lidský zrak nedokáže takový extrém pozorovat najednou. Dynamický rozsah digitálních snímačů (poměr jasu nejtmavší a nejsvětlejší scény) u běžných digitálních čipů (CCD, CMOS) je oproti lidskému zraku výrazně menší – pohybuje se v řádu 1:32 až 1:360.

Základní jednotkou expozice [23] je 1 EV (Exposure Value). Expoziční hodnota rovna nule byla definována Mezinárodní standardizační organizací (ISO) jako expoziční hodnota při cloně $f/1$ a čase 1 sekunda. Zvýšení či snížení expoziční hodnoty o jeden stupeň (1 EV) znamená zvýšení množství světla na dvojnásobek, resp. snížení na polovinu. Zvýšení EV o jeden stupeň lze dosáhnout buď zvýšením expozičního času na dvojnásobek, nebo zmenšením clony o jedno clonové číslo, tzn. vydělením aktuálního clonového čísla hodnotou $\sqrt{2}$. Zmenšení clony o jedno clonové číslo znamená zvětšení otvoru mezi lamelami clony na dvojnásobek. Expoziční hodnota tedy vyjadřuje dynamický rozsah logaritmicky. Zvýší-li se dynamický rozsah o 1 EV, kontrastní poměr se dvojnásobí. Vyjádření dynamického rozsahu pomocí expozičních hodnot a kontrastního poměru je ekvivalentní a vzájemně převoditelné podle vztahu (1.1).

$$2^{EV} = k$$

$$\log_2 k = EV, \quad (1.1)$$

kde k je kontrastní poměr a EV je počet expozičních stupňů dynamického rozsahu fotografie.

Scéna, Záznamový materiál	Kontrastní poměr	Hodnota LV a EV při ISO 100
Krajina zalitá sluncem	1 : 80 000	LV ¹ =16
Noční osvětlené město	1 : 256	LV = 8
Rozsah zdravého oka	1 : 10 000 až 1 : 10 ⁹	EV = 15 – 30
Běžné digitální čipy	1 : 32 až 1 : 360	EV = 5 - 8,5
Čipy v DSLR (CCD, CMOS)	1 : 125 až 1 : 1440	EV = 7 – 13,5
Nikon DSLR D3X (CMOS při ISO 100), 14-bit RAW	Max 1 : 11500	EV = max 13,5

Tabulka 1.1 Ilustrativní hodnoty snímaných scén a snímacích čipů [7].

Jak je patrné z rozdílu kontrastů mezi tím, jak vnímá dynamický rozsah světelné scény lidské oko a digitální fotoaparát, není možné pomocí fotoaparátu zaznamenat celou světelnou dynamiku při jedné expozici fotografického snímku. Pro zachycení maximální možné světelné škály se využívá fotografie s vysokým dynamickým

¹ LV(Light value) je při ISO 100 totožná s EV

rozsahem (High Dynamic Range – HDR), založená obvykle na principu spojování obrazů, které jsou nasnímány s rozdílnou expozicí.

Omezený dynamický rozsah snímacího zařízení je důsledek zejména šumových vlastností. Zvýšení dynamického rozsahu senzoru je tedy možné dosáhnout snížením základní úroveň šumu snímače [6]. Protože dominantní vliv na šum snímače za tmy má tzv. tepelný šum, je možné snížit jeho vliv chlazením snímače. Další cestou k vylepšení šumových vlastností je zvýšení světlocitlivé plochy snímače pomocí BSI CMOS principu [38], který zveřejnila firma SONY v roce 2008. Tímto systémem se redukuje šum o 2dB a světelnost se zvyšuje o 4,5dB. Další možností je využití fotoaparátu obsahujícího několik senzorů s různým expozičním časem [3], případně registrování času dosažení plné saturace každého obrazového bodu [32]. Dynamický rozsah se tak rozšiřuje od nejnižšího času odezvy obvodů (pro nejjasnější místa) až po maximální expoziční čas. Další metodou je SVE [28] (Spatially Varying Exposure), kde se senzor skládá ze čtveřic pixelů s rozdílnou citlivostí. Jeden snímek pak obsahuje čtyři různě exponované snímky, které se za pomoci agregace a interpolace rekonstruují do původního obrazu. Teoreticky se zvýší dynamický rozsah až na 30EV.

1.1 Využití snímků s rozdílnou expozicí

Základním principem pro samotné vytvoření HDR snímku jsou nejméně dvě fotografie LDR (Low Dynamic Range); fotografie podexponovaná a fotografie přexponovaná. Pro lepší výsledek se nejčastěji využívá jedné fotografie s optimální expozicí a devět až dvanáct podexponovaných a přexponovaných snímků k lepšímu zobrazení detailů ve stínech a přexponovaných místech fotografie.



Obrázek 1.1 Fotografie s rozdílnou expozicí

Pro vytvoření HDR snímku je zapotřebí fotoaparát s kvalitním snímačem a nastavitelnou expozicí a nejlépe s vlastností bracketing – sekvenční pořízení několika snímků s rozdílnou expozicí. Pro stabilizaci fotoaparátu se využije stativ, scéna musí být statická. Fotografie se tak pořizují pomocí automatického expozičního bracketingu (AEB). Díky AEB se získají potřebné fotografie na tvorbu HDR snímku, které jsou od sebe posunuty vždy o stejnou hodnotu EV.

Hlavní částí každého digitálního fotoaparátu je snímací senzor, který převádí obrazové informace na elektrický signál. Skládá se z pravidelné obdelníkové matice světlocitlivých buněk (pixelů). Většina digitálních přístrojů používá snímače typu CCD (Charge-Coupled Device) nebo CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). U typu CMOS se tvoří signál pomocí světlocitlivého prvku – fotodiody, která

přeměňuje část optického záření na elektrický signál v důsledku fotovoltaiické odezvy, ke které dochází, vystavíme-li povrch křemíku světlu. Fotony, dopadem na krystalickou mřížku křemíku, dodají dostatečnou energii k uvolnění elektronu. Čím více fotonů, tím více elektronů. CMOS snímač funguje na principu použití tranzistoru u každého pixelu, který zesílí a odvede signál přímo od něj. CMOS senzor se v technické dokumentaci přístroje popisuje zkratkou APS (Active-pixel-senzor). Každý pixel snímače má 3 tranzistory a fotodiodu. Signál se zesílí, přesune na okraj a zaznamená. Každý pixel se zaznamená samostatně nezávisle na okolních pixelech.

Napětí získané snímačem je poměrně malé, a proto musí být zesíleno. Míra zesílení se ovládá nastavením citlivosti. Po zesílení se signál převede na A/D převodník, který změří napětí a přidělí číslo podle toho, kolik má k dispozici úrovní. To závisí na tom, jakou bitovou hloubku daný přístroj používá. Při použití 12bitového převodníku je počet možných hodnot 4096. Převod se provede tak, že se nulovému napětí na senzoru přiřadí číslo 0 (černá) a maximální hodnotě se přiřadí číslo 4095 (bílá). Maximální hodnota odpovídá jeho dynamickému rozsahu. Dopadne-li na fotodiodu více světla, než je schopna převést, dosáhne hranice svého rozsahu. Možná hranice se dá posouvat a upravovat změnou expozice, časem závěrky a změnou citlivosti.

Čas závěrky [22] odpovídá době, kdy mechanismus fotoaparátu nechává dopadat světlo na senzor. Jinou možností, jak nahradit mechanickou závěrku za účelem simulace času, je digitální závěrka. Senzor fotoaparátu je elektronicky sepnut na určitou dobu. Elektronickou závěrkou lze dosáhnout kratších časů, proto se tyto závěrky kombinují. Čas závěrky ovlivňuje množství světla dopadajícího na senzor. Čas se udává v sekundách. Základní stupnice pro nastavení času expozice se pohybuje po krocích 1EV. Posunutím o jeden, kladný EV, krok (EV+1) se prodlouží expoziční čas dvojnásobně. Za dvojnásobný čas na snímač fotoaparátu dopadne dvojnásobné množství světla, a proto se takto pořízený snímek jeví pro člověka dvojnásobně osvětlený. Základní časová expoziční řada postupuje po krocích 1EV. Vyjádřeno v konkrétních časech to je 1/1000s, 1/500s, 1/250s, 1/100s. Pro fotografickou praxi nejsou tyto kroky dostatečně malé, a proto lze čas nastavit také po menších krocích (1/3 EV, 1/2 EV). Zde je nutno upozornit, že základní řada má logaritmický charakter, který odpovídá logaritmickému vnímání světla. Časová řada je zaokrouhlena. Po času 1/15s následuje 1/8s a taky po času 1/125 následuje 1/60. Zaokrouhlení této řady pochází z analogové techniky a důvody jsou čistě netechnické.

ISO citlivost určuje, jak je obrazový snímač citlivý na světlo. Čím vyšší je citlivost ISO – zesílení elektronické hodnoty na snímači, tím nižší bude čas expozice potřebný k sejmutí dostatečně exponovaného snímku. Díky tomu se zvyšuje i šum [10] ve snímaném obraze, který vzniká zahříváním snímače. Šum je také dán samotným elektronickým obvodem ve fotoaparátu. ISO citlivost se při použití v laboratorních podmínkách a při využití stativu ponechá na ISO 100, čili na nejnižší hodnotě. Není tedy potřeba zkracovat expoziční čas, a díky tomu se dosáhne i minimálního šumu v pořizovaných snímcích.

Snímky jsou ukládány do 12 až 16 bitového obrazového formátu RAW [31], formát obsahuje nezpracovaná data ze senzoru a informace o okolnostech pořízení snímku (metadata). Formátu RAW se říká „digitální negativ“. Data neobsahují vyvážení bílé a není definován bílý bod ani gamma křivka. Data nejsou rozdělena na složky RGB. Tato úprava se dále řeší pomocí Bayerovy masky [31]. Fotoaparát Canon formát

RAW ukládá s příponou *.CRW nebo *.CR2, fotoaparát Nikon s příponou *.NEF, fotoaparát Pentax s příponou *.PEF atd. Pro převod do jiného formátu např. formátu TIFF je zapotřebí využít potřebný program, který je zpravidla dodáván společně s fotoaparátem. RAW konvertor je obsažen i v programu Zoner Photo Studio, nebo po nainstalování Camera RAW modulu do programu Adobe Photoshop CS3. Pro laboratorní účely bude stačit sejmoutí fotografie ve formátu JPEG.

JPEG poskytuje ukládání obrazu do 8 bitového formátu v rozsahu 0 až 255 pro každý barevný kanál RGB. Na každý pixel připadá 24 bitů. Data jsou komprimovaná a dochází k částečné ztrátě informací.

1.2 Vytvoření radianční mapy z křivek odezvy fotoaparátu

Pro vytvoření fotografie s vysokým dynamickým rozsahem z několika snímků s nízkým dynamickým rozsahem se vyvinulo hned několik postupů. Hlavním cílem je obnovit radianční mapu, což znamená nalézt absolutní hodnotu dopadajícího světla na každý pixel senzoru. Většina postupů je popsána v práci Optimal HDR Reconstruction with Linear Digital Cameras [25]. Využívá se váženého průměru spojeného s vhodnou váhovou funkcí. Váhová funkce dodá váhu důležitým pixelům a snižuje hodnoty, které jsou nadbytečné (přepaly, šum). Je potřebné nejdříve získat vyrovnané snímky zbavené extrémů, které se spojí pomocí váženého průměru do snímku s vysokým dynamickým rozsahem.

Na spojení několika snímků s rozdílnou expozicí se využívá vážený průměr hodnot x_i [8], který je definován vztahem

$$\hat{x}_i = \frac{f^{-1}(v_i)}{t_i}, \quad (1.2)$$

kde f^{-1} je inverzní funkce fotoaparátu definovaná vztahem (1.9), v_i -digitální hodnota získaná z čipu odpovídající dopadajícímu světlu a t_i - doba expozice i-tého bodu. Do váženého průměru je dále vložena váhová funkce w a je pak definován jako:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_i w(v_i) \hat{x}_i}{\sum_i w(v_i)}, \quad (1.3)$$

kde w je váhová funkce s důrazem na výstupní hodnotu skrz celý snímek.

Způsobů, jak řešit váhovou funkci je hned několik. V roce 1995 využil Mann a Pickard [36] váhovou funkci ke kompenzaci kvantizační chyby

$$w = \frac{1}{\frac{d}{dv}(\log f^{-1}(v))}, \quad (1.4)$$

kde f^{-1} je inverzní funkce fotoaparátu, v je digitální hodnota získaná z čipu odpovídající dopadajícímu světlu.

V roce 1997 využili Debevec a Malik [11] funkci Hat, ve které přiřadili váhu hodnotám daleko od saturovaných bodů

$$w = \min(v - v_{min}, v_{max} - v), \quad (1.5)$$

kde v je hodnota dopadajícího světla, v_{min} a v_{max} jsou extrémní hodnoty.

V roce 1999 navrhli Mitsnaga a Nayar [39] váhu na základě odstupu signálu a šumu

SNR. Předpokladem je, že šum je hodnota nezávislá na měřeném pixelu. Funkce se počítá jako:

$$w = \frac{f^{-1}(v)}{\frac{d}{dv}f^{-1}(v)}, \quad (1.6)$$

kde $f^{-1}(v)$ je inverzní funkce fotoaparátu.

Další metody jsou patrné v tabulce 1.2:

Tabulka 1.2 Váhové funkce pro rekonstrukci HDR.

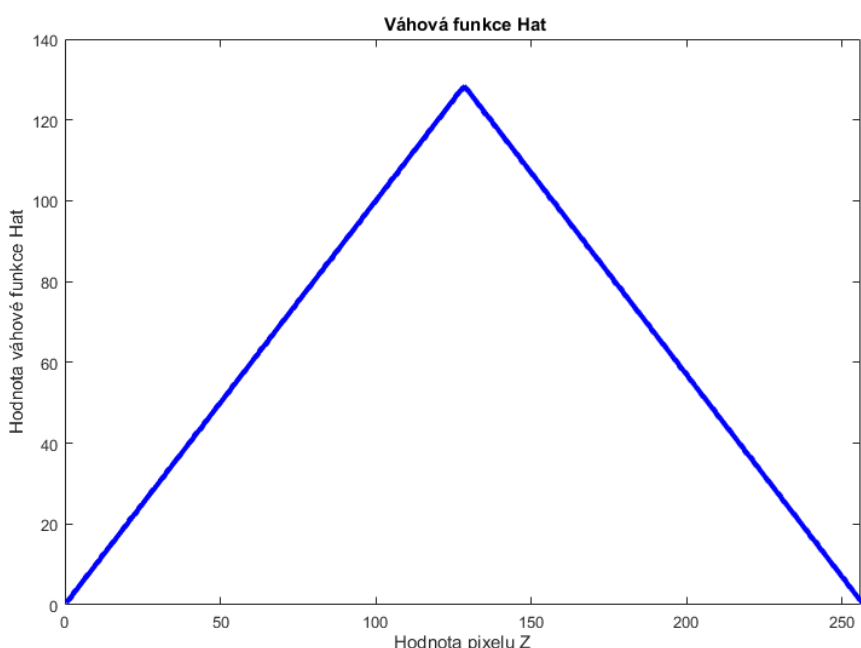
<u>NÁZEV METODY</u>	<u>TYP</u>	<u>VÁHOVÁ FUNKCE</u>
Mann a Picard [36]	Quant.	$\frac{1}{\frac{d}{dv}(\log g(v))}$
Debevec a Malik [11]	Hat	$\min(v - v_{min}, v_{max} - v)$
Mitsunaga a Nayar [39]	SNR	$\frac{g(v)}{g'(v)}$
Reinhard a kol. [14]	SNR.Hat	$\frac{g(v)}{g'(v)} \left[1 - \left(\frac{v}{v_{mid}} - 1 \right)^{12} \right]$
Robertson a kol. [26]	Variance	$\frac{t^2}{\frac{d}{dv}(\log g(v))}$
Tsin a kol. [42]	St.dev.	$\frac{t}{\hat{\sigma}_{g(v)}}$
Kirk a Andersen [20]	Variance	$\frac{t^2}{g'(v)^2 \sigma_v^2}$

Metoda Debevec a Malik - Sestrojení Křivek odezvy RGB [11]

K vytvoření křivek odezvy je potřeba znát váhovou funkci w , vzorek pixelů N z každého RGB kanálu zvlášť, expoziční časy každého snímku a koeficient pro vyhlazení funkce. Váhová funkce použitá v metodě Debevec a Malik:

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{pro } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{pro } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases}, \quad (1.7)$$

kde Z_{min} a Z_{max} zde udávají maximální hodnoty pixelů (0 nebo 255). Největší váhu mají pixely, které se svojí hodnotou blíží ke středu.



Obrázek 1.2 Váhová funkce Hat použitá v metodě Debevec a Malik

Dalším krokem je získání inverzní funkce f^{-1} . Vztah mezi intenzitou E_i a dobou trvání expozice Δt_j je

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j). \quad (1.8)$$

Lze předpokládat, že funkce je monotónní, tudíž se může invertovat.

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j \quad (1.9)$$

Pomocí přirozeného logaritmu se rovnice upraví do tvaru:

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j. \quad (1.10)$$

Definuje se funkce $g = \ln f^{-1}$ jako:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j, \quad (1.11)$$

kde známé hodnoty jsou hodnota pixelu Z_{ij} a doba trvání expozice Δt_j . Neznámé hodnoty jsou intenzita E_i a funkce g . Funkce g je monotónní. Pro nalezení hodnot se použije metoda nejmenších čtverců. Využije se kvadratická funkce 1.12:

$$\theta = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (1.12)$$

První člen vyplývá z definice funkce g metodou nejmenších čtverců. Druhý člen je druhá derivace součtu čtverců, která slouží pro vyhlazení funkce g . V tomto diskrétním nastavení se použije

$$g''(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1) \quad (1.13)$$

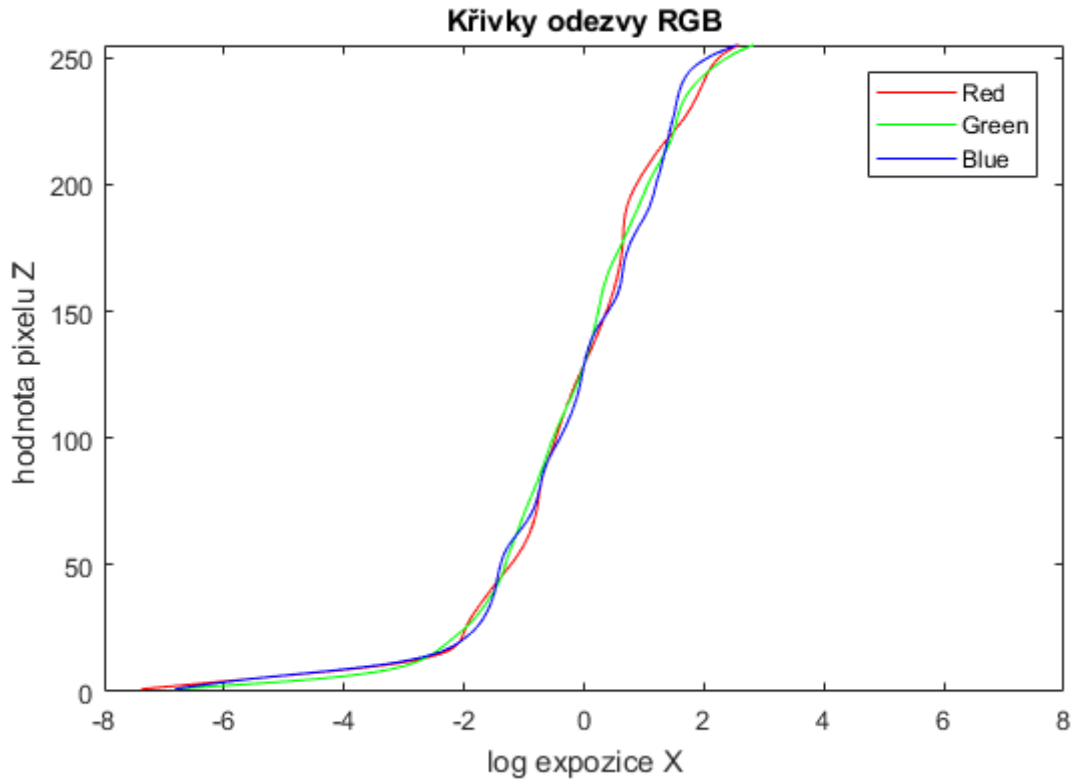
Skalár λ by měl být zvolen odpovídajícím způsobem pro očekávané množství šumu v měření Z_{ij} . Dále se do lineární rovnice přidá váhová funkce Hat . Funkce $g(z)$ bude u extrémů Z_{min} a Z_{max} více strmá. Váhová funkce se přidá ke zdůraznění dat ve středu oblasti. Váhová funkce Hat je popsána rovnicí 1.7. Po úpravě rovnice 1.12 pak vypadá:

$$\theta = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z)g''(z)]^2\} \quad (1.15)$$

K vytvoření funkce g se nemusí používat všechny dostupné pixely. Řeší se tedy pro N hodnot $\ln E_i$ a $(Z_{max} - Z_{min})$ vzorků z funkce g . K zajištění dostatečného počtu vzorků stačí:

$$N * (P - 1) > (Z_{max} - Z_{min}), \quad (1.16)$$

kde N je počet pixelů, P je počet fotografií a rozsah $(Z_{max} - Z_{min})$ je 255. Pro $P = 11$ fotografií postačí $N = 50$ pixelů.



Obrázek 1.3 Křivky odezvy RGB kanálů.

Rekonstrukce radianční mapy

Jakmile jsou obnoveny křivky odezvy g , může se přejít k převedení hodnot obrazových bodů na relativní hodnoty jasu.

Z rovnice,

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (1.17)$$

dostaneme

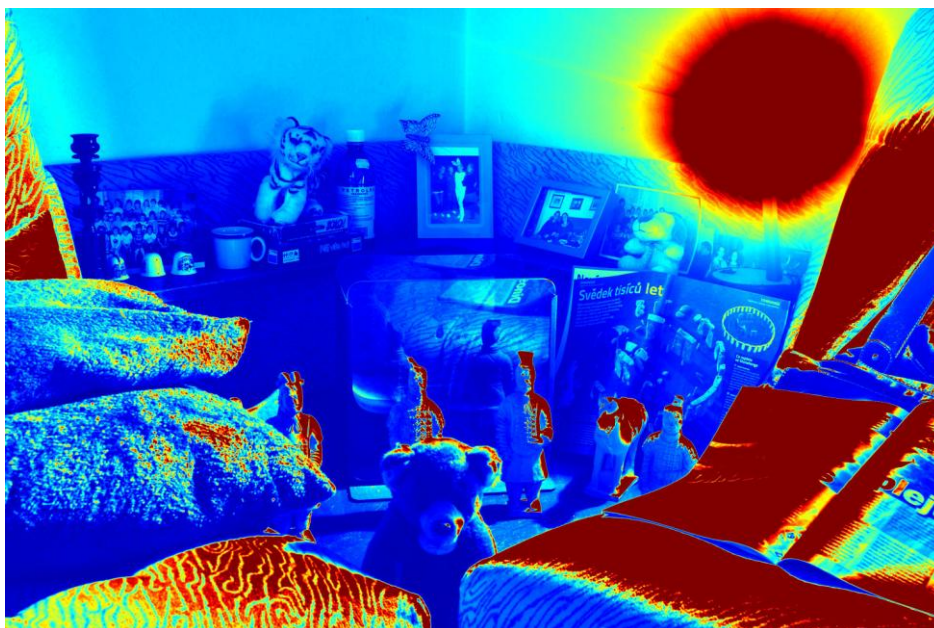
$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j. \quad (1.18)$$

Měly by se využít všechny dostupné expozice pro určitý pixel ke spočítání jeho vysoké hodnoty. Za tímto účelem se znovu použije váhová funkce Hat . Dá se tak větší váha na expozici, v níž hodnota pixelu je blíže ke středu funkce odezvy.

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij}) (g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (1.19)$$

Vytvoří se jasová mapa, která má hodnoty typu double – 64bitové číslo. Dalším krokem

je jasovou mapu uložit do některého z HDR formátů, nebo ji převést do LDR snímku za pomoci některé z metod pro mapování tonality.

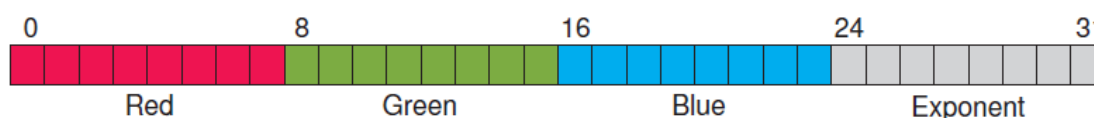


Obrázek 1.4 Zobrazení radianční mapy, červená zobrazuje místa s maximálním jasnem a tmavě modrá místa zobrazují místa s nejnižším jasnem.

1.3 Formáty HDR (RGBE, OpenEXR)[19]

Existuje celá řada formátů určená především pro ukládání HDR snímků. Mezi nejpopulárnější patří formát HDR a OpenEXR. Běžné formáty mají hodnoty pixelů od 0 do 255, což je pro jasovou mapu, která obvykle nabývá hodnot datového typu double, nedostačující.

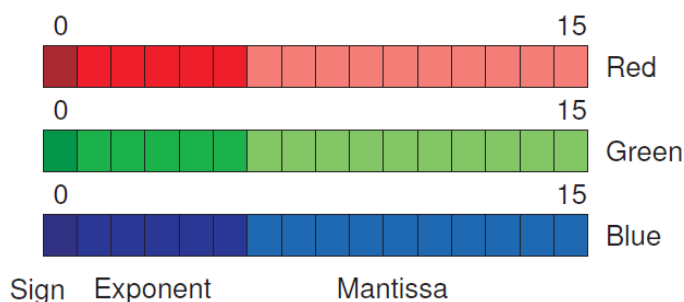
Jedním z nepoužívanějších formátů je formát HDR, který používá kódování RGBE [34]. Je jedním z prvních HDR formátů. Byl zaveden v roce 1989. Obrazové body jsou kódovány pomocí XYZE nebo RGBE formátu pixelu. Rozdíl mezi formátem RGBE a XYZE je v tom, že formát RGBE využívá primárně kanály barevného prostoru RGB (základními barevnými světly jsou červená, zelená a modrá), zatímco systém XYZE je založen na formátu CIE 1931 XYZ. Jak je patrné z obrázku 1.5, první tři složky označují hodnoty RGB a čtvrtá společný exponent. Ve formátu XYZE složka Y vyjadřuje jas, zbývající složky X a Z pak pozici v barevné paletě. Každá složka obsahuje 8 bitů. Formát používá příponu *.hdr nebo *.pic.



Obrázek 1.5 32 bitů na pixel v RGBE kódování [19].

Od roku 2002 je k dispozici otevřený formát ILM OpenEXR(.exr)[19], vyvinutý ve studiu Industrial Light & Magic pro práci se speciálními vizuálními efekty. Podporuje

32 bitovou reprezentaci čísel, ale jeho základní tvar je omezen na 16 bitů při primárním kódování RGB. Tento takzvaný poloviční formát je kompatibilní s polovičním datovým typem NVIDIA CG, který je široce podporován v počítačové grafice [22].



Obrázek 1.6 Bitové kódování pro OpenEXR Half [30]

1. bit určuje kladou nebo zápornou hodnotu pixelu. 5 bitům je přidělen exponent a 10 bitům je přidělena mantisa. Tento formát je nazýván také S5E10. V této hlavní variantě je schopen zaznamenat dynamický rozsah až $1:10^{10,7}$ s kvantizačním krokem 0.1%. Pokrývá tedy celý vnímatelný rozsah barev.

Mezi další využívané formáty [19] patří Pixar Log (.tif), SGI LogLuv (.tif), 96 bitový TIFF / PFM, Microsoft/HP scRGB, RAW/DNG, FITS, DDS, Kodak Cineon/DPX nebo JPEG-HDR/ERI-JPEG/JPEG 2000.

2 KONVERZNÍ TECHNIKY

Obvyklým požadavkem pro možnost zobrazení snímků s vysokým dynamickým rozsahem na konvenčních displejích je transformace do fotografie s nízkým dynamickým rozsahem. Takovéto konverzní techniky se obecně označují anglickým termínem Tone Mapping (mapování tonality světla). Zakládá se na několika postupech převodu vysokého rozsahu jasových hodnot na nízký rozsah jasových hodnot. Tato práce se zabývá několika globálními metodami (jednoduché operátory logarytmus, odmocnina, změna rozsahu, optimalizace, Reinhardův globální operátor, adaptivní logaritmické mapování) a několika lokálními metodami (metoda Fattal: gradientní doménová komprese, metoda Durand: bilaterální filtrování a Reinhardův lokální operátor). Mezi základní metody patří úpravy pomocí operátorů tónového mapování. Jejich souhrn včetně nejdůležitějších vlastností je k dispozici v tabulce 2.1.

Metoda	Definice	Výhody	Nevýhody	Operátory
Globální operátor	redukce DR, úprava každého pixelu zvlášť	výpočetně efektivní, reálný čas, rychlejší, nízká složitost	pro extrémně vysoký DR nemusí zachovat viditelnost	Miller's operator, Tumblin–Rushmeier's operator, Ward's scale factor, Ferwerda's operator, Ferschin's exponential mapping, Logarithmic mapping, Drago's logarithmic mapping, Reinhard's global photographic operator, Reinhard and Devlin's photoreceptor model, Ward's histogram adjustment, Schlick's uniform rational quantization
Lokální operátor	individuální výpočet pro každý pixel na základě posouzení sousedních pixelů	flexibilní, adaptivní	náročnější	Chiu's spatially variant operator, Rahman and Jobson's multiscale retinex, Johnson and Fairchild's iCAM, Ashikhmin's operator, Reinhard's local photographic operator
Frekvenční operátor	DR se sníží o kompresi jasové složky v závislosti na prostorové frekvenci	zachování okrajů	složky vysokých frekvencí způsobí rychlé změny jasu	Horn's lightness computation, Fattal's gradient domain compression
Operátor Gradientu	derivace snímku je modifikovaná	možné další úpravy	velká komprese má za následek přehnané detaily	Oppenheim's operator, Durand's bilateral filtering

Tabulka 2.1 Tabulka konverzních technik [4]

2.1 Zobrazení snímků s vysokým dynamickým rozsahem na běžných zobrazovačích

V dnešní době existuje několik možností přímého zobrazení HDR snímku. Komerčně dostupný HDR displej je například vyráběn firmou BrightSide Inc [37]. Technika zobrazení spočívá ve spojení LCD a LED technologie. Technologie LED vytváří podsvícení displeje z tekutých krystalů. V LCD je displej rovnoměrně podsvícen. V této technologii je každý pixel podsvícen zvlášť. Displej dokáže zobrazit kontrast 200 000 : 1 (18EV). Další možností je podsvícení LCD displeje digitálním projektorem. Světlo prochází černobílým displejem LCD, který zodpovídá za jasovou složku a následně druhým displejem, který zodpovídá za barevné rozlišení. Problém je ve velikosti soustavy, energetické náročnosti a velkému výdeji tepla.

Běžný uživatel ale vlastní displej s nízkým dynamickým rozsahem. Pro zobrazení obsahu s vysokým dynamickým rozsahem je nutná komprimace HDR na LDR.

2.2 Algoritmy pro zpracování radianční mapy

Pro skládání snímků pomocí Tone Mappingu [11] se využívá několik základních algoritmů pojmenovaných podle svých autorů. Jsou to algoritmy Reinhard, Drago, Fattal, Retinex, Tumblin, Ward, Ashikhmin, Durand a další viz přehled v tabulce 2.1.



Reinhard



Drago



Tumblin



Ward



Obrázek 2.1 Snímky konvertované z HDR na běžný dynamický rozsah s využitím rozdílných algoritmů. Převzato z [17].

Reinhardova[35] metoda byla publikována roku 2002 a využívá automatického výběru hodnoty pro výpočet přizpůsobení jasu obrázku pomocí zónového systému, který využíval i Ansel Adams[2] v analogové fotografii. Metoda vhodně exponuje několik tzv. zón na fotografii a složením dílčích snímků vytvoří fotografii s vysokým dynamickým rozsahem.

Metoda Drago[12], byla publikovaná roku 2003 a využívá adaptivního logaritmického mapování. Logaritmická komprese jasových hodnot imituje reakci lidského oka na světlo. Adaptivně mění logaritmickou základnu, což zachovává detail a kontrast.

Tónová reprodukce realistického obrazu Jacka Tumblina[40] a Hollyho Rushmeiera z Institutu technologie v Georgii je další metoda, která řeší zaostřování oka na jeden bod obrazu, ostatní oblasti zeslabuje a rozostří. Tato metoda tedy nevytváří reálné snímky při zaostření na celý obraz. Je ovšem využitelná v počítačové grafice například v počítačových hrách, kde dochází ke snížení využitých dat.

Roku 1997 Gregory Ward Larson a spol.[24] zpracovali kompresní algoritmus, který využívá skutečnost, že lidé jsou necitliví na relativní a absolutní rozdíly v jasu. Úpravou histogramu se mezera mezi nejnižší a nejvyšší úrovní jasu uzavře. Je to

provedeno tak, aby byl výsledek slučitelný se subjektivními aspekty vidění.

Algoritmus Fattal [16] patří mezi oblíbené. Je však odsuzován za přemělkování a nereálnost obrazu, což některým fotografům nevyhovuje. Algoritmus Fattal byl vypracován roku 2001. Algoritmus pracuje s vlastnostmi sousedících pixelů a využívá gradientní doménovou kompresi. Využitím gradientu v různých měřítkách obrazu se projdou všechny potřebné body a najdou se vysoké hodnoty gradientu, které se utlumí. Vytvoří se tak pole gradientu, které se převádí řešením Poissonovy rovnice na nový snímek.

Ashikhminův[5] princip je založen na jediném parametru – maximálním povoleném lokálním kontrastu. Výsledný snímek je pak jasnější, ale pozbývá detailů v tmavých místech.

Retinexova[43] metoda hledá bod s nejvyšší hodnotou jasu, kterou označuje jako bílou. Od této hodnoty se pak provádí vyvážení bílé barvy. Získají se koeficienty pro každou složku RGB. Koeficienty se pak využijí k výpočtu jednotlivých barevných kanálů. Tím vznikne vyvážený snímek.

Durandova[13] metoda pracuje s bilaterální filtrací snímku. Rozkládá obraz do dvou vrstev. První vrstva je zaměřená na vysoké hodnoty jasu (základní) a druhá vrstva je zaměřena na detail. U základní vrstvy se sníží kontrast, tím se zachovají detaily. Použije se bilaterálního filtru, kde se každý pixel počítá pomocí Gaussovy funkce. Dva nejbližší pixely se zprůměrují, čímž dojde k potlačení velkých rozdílů intenzit. Následně se vrstvy opět spojí v jeden obraz.

Další metody jsou popsány v práci Erika Reinharda [35].

Pro další práci byly vybrány metody Erika Reinharda, F. Duranda, Raanana Fattala a Frédo Duranda. Každá z vybraných metod popisuje speciální postupy pro komprimaci HDR do snímku s nízkým dynamickým rozsahem. Erik Reinhard využívá zónového systému, F. Durand využívá adaptivního logaritmického mapování, Raanan Fattal využívá gradientní doménovou kompresi a Frédo Durand využívá bilaterálního filtrování.

2.3 Algoritmy pracující s globálními operátory

Algoritmy pracující s globálními operátory se vztahují na celou oblast radianční mapy. Pro porovnání byly vybrány jednoduché globální operátory pomocí logaritmicizace, odmocnění, změny rozsahu, optimalizace (adaptivní nastavení jasu) a metody Reinhard global operator a metoda Drago (adaptivní logaritmické mapování).

2.3.1 Jednoduché globální operátory logaritmus, odmocnina a optimalizace

Mezi nejjednodušší globální operátory patří logaritmus, odmocnění a změna rozsahu na hodnotu [0,1]. Jednoduché globální operátory upravují hodnoty vysokého rozsahu do nižšího rozsahu, který se může lépe zobrazit.

Optimalizace - Adaptivní nastavení jasu:

Operátor změny rozsahu na hodnotu [0,1] pomocí rovnice:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{I_{in}+1}, \quad (2.1)$$

kde I_{in} je vstupní jas pixelu, mapuje vstupní rozsah [0,1] na hodnoty [0,0.5] a rozsah [1,∞] na hodnoty [0.5,1]. Podrobněji tedy mapuje oblast v tmavším rozsahu. Byl zaveden logaritmický globální operátor.

$$I_{out} = (D_{max} - D_{min}) * \frac{\log(I_{in}+\tau) - \log(I_{min}+\tau)}{\log(I_{max}+\tau) - \log(I_{min}+\tau)} + D_{min}, \quad (2.2)$$

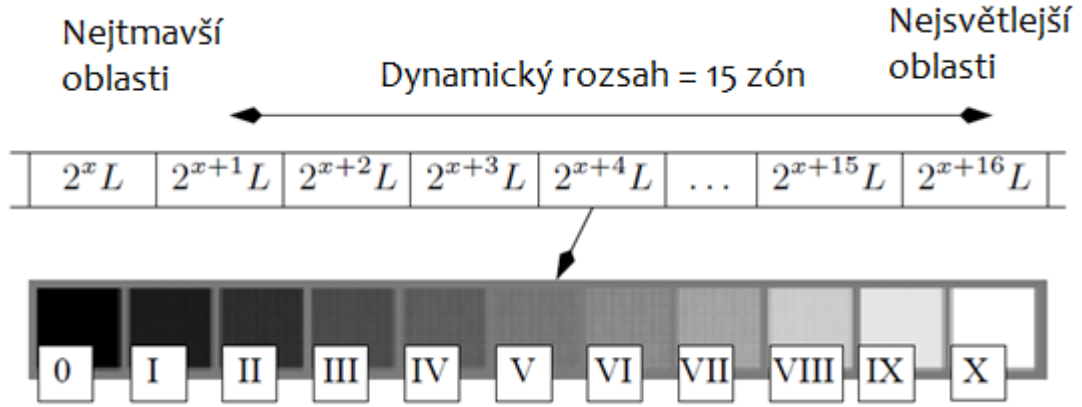
kde $D = [0,255]$ je rozsah intenzity zobrazovacího zařízení a kde τ se vypočítá jako

$$\tau = \alpha(I_{max} - I_{min}), \quad (2.3)$$

kde τ , pomocí vhodné úpravy parametru α , vhodně naladí celkový jas obrazu. Okolo hodnoty $\alpha = 0$ bude jas intenzivní. Zvýšením hodnoty se jas sníží. Pokud je hodnota nekonečná bude I_{out} roven I_{in} .

2.3.2 Reinhardova metoda mapování tónů. [35]

Metoda se zaměřila na zónový systém, který poprvé použil Ansel Adams [2]. Existuje 11 a více zón v rozsahu jasu scény. Každé zdvojnásobení intenzity rozšíří počet zón.



Obrázek 2.2 Mapování zón od černé (zóna 0) po bílou (zóna X), pokud je rozsah větší nebo rovno 11 zónám. Převzato z [35].

Střední hodnota je typická pro zónu V. V této metodě se od středu dynamického rozsahu odráží a dále počítá, kolik zón je potřeba.

Dodging and burning je technika, při které je odepráno, nebo přidáno světlo ve vybrané zóně fotografie. Aplikuje se dynamická komprese rozsahu. Nejdřív se zmapuje počáteční jas:

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp (\sum_{x,y} \log (\delta + L_w(x, y))), \quad (2.4)$$

kde $L_w(x, y)$ je jas pro každý pixel, N je počet pixelů v obraze a δ je minimální hodnota, která je nutně použita pokud je v obraze obsažena černá (hodnota 0). Tím se získá střední tón nebo se využije hodnota 0.18 při měřítku od 0 do 1, čímž se získá rovnice:

$$L(x, y) = \frac{a}{L_w} L_w(x, y), \quad (2.5)$$

kde $L(x, y)$ je měřítko jasu a hodnota $a = 0.18$. Hodnotu a můžeme dělit, nebo násobit dvěma, tím dostaneme jiné hodnoty jasu. Využívá se při snímání fotografií skenováním.

Pro stlačování především vysokých jasů se používá jednoduchého mapování tónů:

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2})}{1 + L(x, y)}, \quad (2.6)$$

kde L_{white} je nejmenší jas mapující čistou bílou. Pokud nastavíme $L_{MAX} = L_{white}$, nebo vyšší, nedojde k přepalům. Dojde však ke ztrátě detailu. Zavádí se automatická dynamická komprese rozsahu (Dodging and burning). Využívá se odečtení dvou gaussovských rozostřených obrazů. Pro rozostření se využívá funkce za použití kruhově symetrického Gaussova profilu ve tvaru:

$$R_i(x, y, s) = \frac{1}{\pi(\alpha_i s)^2} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{(\alpha_i s)^2} \right), \quad (2.7)$$

kde se pracuje s různými měřítky s a s různými polohami obrazu (x, y) . Konvoluce obrazu a obrazů s gaussovským rozostřením má za následek odezvu V_i jako funkci umístění obrazu, rozsahu a rozložení jasu L .

$$V_i(x, y, s) = L(x, y) \otimes R_i(x, y, s) \quad (2.8)$$

Pro dostatečnou přesnost je zavedena center-surround funkce:

$$V(x, y, s) = \frac{V_1(x, y, s) - V_2(x, y, s)}{2^{\frac{a}{s^2}} + V_1(x, y, s)}, \quad (2.9)$$

Kde odezvy V_1 centrum a V_2 surround jsou odvozeny z rovnice (2.8). V_1 je práh V nezávislý na absolutní hodnotě jasu. Parametr $2^{\frac{a}{s^2}}$ zabraňuje, aby se V stalo příliš velkým, když se V blíží k nule. Parametr a je hodnota klíče a Φ je parametr ostření. Dostačující změna mezi hodnotami V_1 a V_2 se dosahuje změnou rozsahu s o hodnotu 1,6 pro dosažení nejlepších výsledků. Pro nejnižší úroveň s_{min} platí že:

$$|V(x, y, s_{min})| < \epsilon, \quad (2.10)$$

kde ϵ je prahová hodnota.

Lokální operátor se změní na globální výměnou V_1 za L :

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + V_1(x, y, s_m(x, y))}, \quad (2.11)$$

kde jas tmavého pixelu v poměrně světlé oblasti uspokojí $L < V_1$, takže tento operátor sníží jas displeje L_d , čímž se zvyšuje kontrast v daném pixelu. Podobně pixel v relativně tmavé oblasti bude komprimován méně. V obou případech se kontrast pixelu ve vztahu k okolí zvýší. Tato technika ztmaví, nebo zesvětlí vybranou oblast.

Reinhardův globální operátor [15,35].

Jsou zavedeny dva parametry m a f , které ovládají kontrast a intenzitu. Parametr m se vytvoří za pomoci klíče k , který lze odhadnout z logaritmického průměru, logaritmického minima a maxima jasu (L_{av} , L_{min} , L_{max}).

$$k = \frac{L_{max} - L_{av}}{L_{max} - L_{min}} \quad (2.12)$$

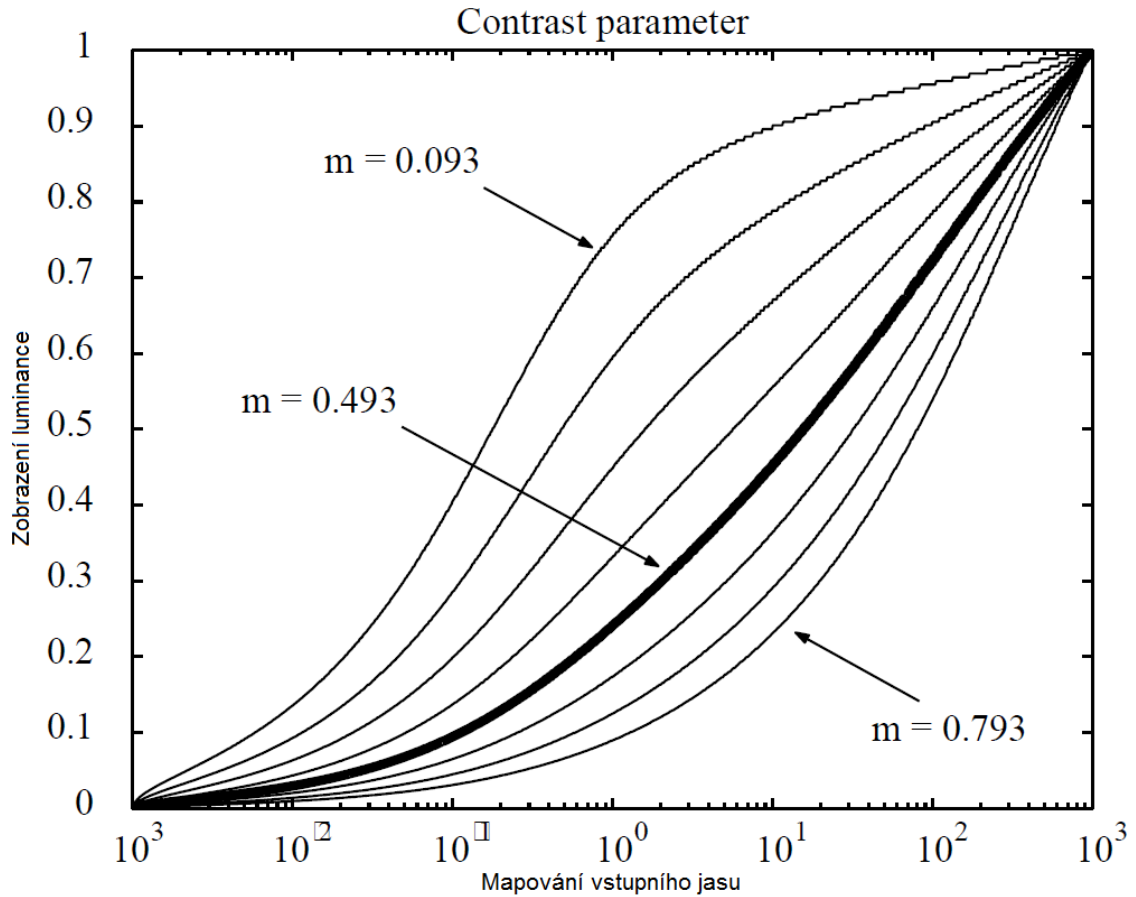
Jas vypočítáme z rovnice:

$$L = 0.2125 * I_r + 0.7154 * I_g + 0.0721 * I_b, \quad (2.13)$$

kde I_r , I_g , I_b jsou barevné složky snímku. Reinhard zvolil mapování klíče k do exponentu m následovně.

$$m = 0.3 + 0.7 k^{1.4} \quad (2.14)$$

Mapování je založeno na rozsáhlém experimentování. Rozsah operátoru je $[0.3, 1]$. Rozdílné hodnoty m operátoru mění kompresní křivku viz obrázek 2.3.



Obrázek 2.3 Mapování vstupního jasu pro zobrazení jasu při různých hodnotách m . Převzato z [15].

Podobně může být uživatelsky měněn parametr f . Vhodná počáteční hodnota je 1. Parametr f je nahrazen exponenciální funkcí $f = \exp(-f')$. Změnou parametru f' měníme celkové hodnoty intenzity. Vyšší hodnoty učiní výsledek světlejší, nižší hodnoty učiní obraz tmavší. Rozsah tohoto parametru je -8 a 8. Při hodnotě $f' = 0$ je hodnota $f = 1$. Průběhy jsou podobné jako u parametru m .

Hodnota každého kanálu RGB se získá z rovnice:

$$V = \frac{I}{I + \sigma(I_a)} V_{max}, \quad (2.15)$$

kde $\sigma(I_a) = (f I_a)^m. \quad (2.16)$

Hodnota I_a se spočítá jako vážený součet pixelů jasu L a hodnoty intenzity kanálu:

$$I_a = c I_{r,g,b} + (1 - c) L, \quad (2.17)$$

kde hodnota váhové funkce může být v rozsahu $[0,1]$. Nastavením parametru na hodnotu 1 se zpracovávají barevné kanály nezávisle. Váhová funkce c se nastavuje na hodnotu 0, takže úroveň adaptace je stejná pro všechny tři barevné kanály. Pro zjištění zda přizpůsobení pixelů je založeno na intenzitě pixelu nebo na globálním průměru se použije rovnice:

$$I_a = a I_{r,g,b} + (1 - a) I_{r,g,b}^{av}, \quad (2.18)$$

kde je použita váha a , která interpoluje mezi intenzitou I a průměrnou intenzitou I_{av} . Pro hodnotu $a = 0$ je přizpůsobení založeno na intenzitě pixelu. Pro globální použití je hodnota nastavena na 0. Pak je I_a rovno průměrné hodnotě. Lokální Reinhardova metoda dále pracuje s nenulovou hodnotou váhového parametru a .

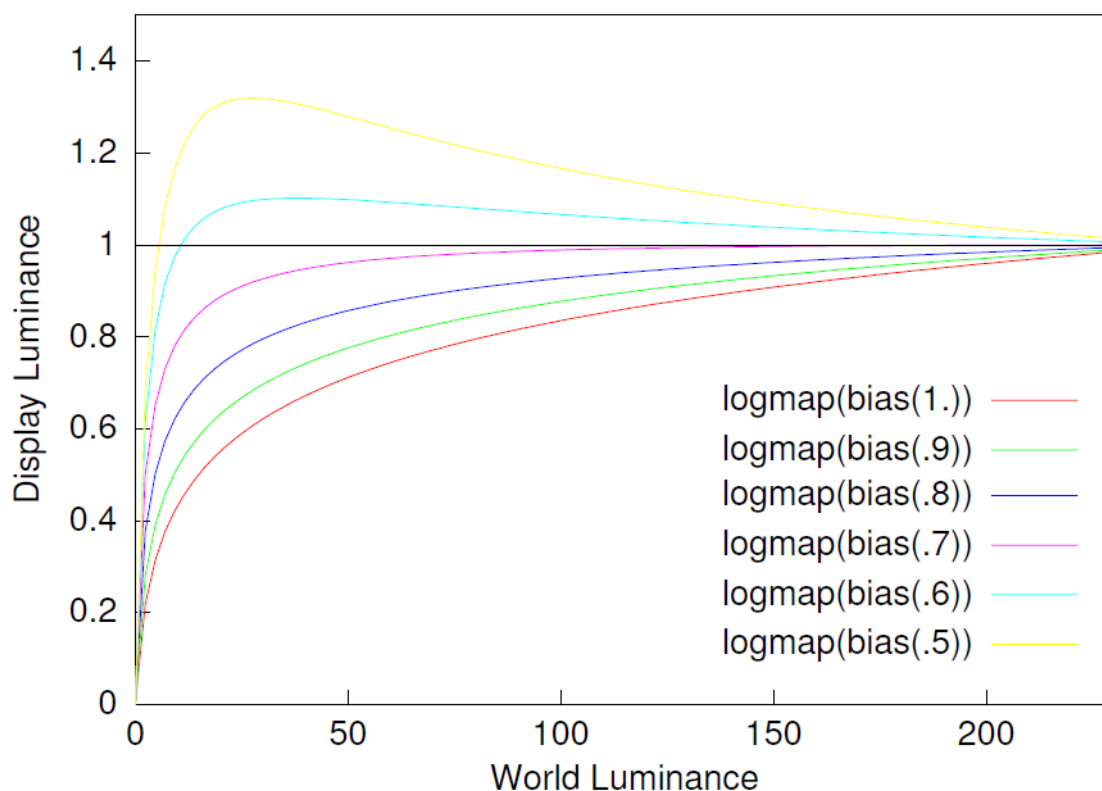
2.3.3 Adaptivní logaritmické mapování metody Drago [12]

Autoři této metody vytvořili rychlý algoritmus tónového mapování. Je založena na logaritmické kompresi jasových hodnot imitující reakci lidského zraku na světlo. Předpokládá se nastavení hodnoty bílé D65 ve specifikačním systému RGB . Hodnoty jasu se převedou na hodnoty XYZ .

Funkce mapování:

$$L_d = \frac{L_{dmax} * 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} * \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right)^8\right)}, \quad (2.19)$$

kde je L_{dmax} využíván jako měřítko rozsahu pro zamýšlené zobrazení. Parametrem b se nastavuje komprese vysokých hodnot a zobrazení detailů v tmavých oblastech.



Obrázek 2.4 Vlastnost parametru b na výsledný jas. Převzato z [12].

Hodnoty b mezi 0.7 a 0.9 subjektivně tvoří nejlepší obrázky. V práci Drago je doporučena hodnota $bias = 0.85$ (zkreslení) pro konzistentní a dobře vyvážený obraz.

Vedlejším efektem změny parametru zkreslení je kolísání jasu výstupního obrazu. Při $b = 0,85$ je jas přibližně zdvojnásoben a při hodnotě 0,7 ztrojnásoben ve vztahu k hodnotě $b = 1,0$. Využívá se měřítko L_{wa} zaměřené na udržení dojmu konstantního

jasu. Vychází se z parametru zkreslení 0,85.

$$L_{wa} = L_{wa}/(1 + b - 0.85)^5 \quad (2.20)$$

Dále se využívá korekce gradačního zkreslení (gamma) ke kompenzaci nelinearity zobrazovacích zařízení. Funkce korekce je:

$$L_d = L_w^{1/\gamma}, \quad (2.21)$$

kde γ je koeficient gradačního zkreslení. Korekce je aplikovaná na hodnotu RGB po tone mappingu a konverzi z CIE XYZ. γ má pravidelně hodnotu 2,2 a nastavuje se na hodnotu $\gamma = 2$ až $\gamma = 1.125$. Vylepšuje kontrast v temných bodech.

2.4 Lokální operátory

2.4.1 Metoda Fattal (gradientní doménová komprese) [16]

Metoda je podle autorů koncepčně jednoduchá, výpočetně efektivní, robustní a snadno použitelná. Nový LDR snímek se získá za použití Poissonovy rovnice na pozvolné změny gradientního pole. Metoda je schopna drastické komprese dynamického rozsahu při zachování detailů. Metoda je postavena na předpokladu, že lidský zrak není velmi citlivý na absolutní hodnoty jasu sítnice, ale reaguje na změny poměrů intenzit a snižuje účinek velkých globálních rozdílů. Zakládá se na předpokladu, že velké změny jasu mají za následek velké hodnoty gradientů. Drobné hodnoty jako jsou detaily a struktura budou mít hodnoty gradientů menší. Princip spočívá v nalezení velkých gradientů a jejich vhodném potlačení při zachování směru. Výpočty jsou prováděny na logaritmu jasu, vzhledem k logaritmickému vnímání světla lidským zrakem.

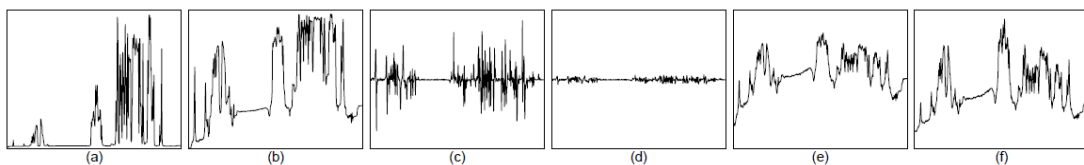
Algoritmus je na začátku vysvětlen v jednorozměrném prostoru. $H(x)$ je logaritmus jasu. Cílem je zmenšit vysoké změny hodnot jasu při zachování lokálních malých změn jasu. Využije se vhodné prostorové variantní tlumící funkce $\Phi(x)$ a derivace $H'(x)$:

$$G(x) = H'(x) \times \Phi(x), \quad (2.22)$$

kde funkce $G(x)$ je stejná jako funkce $H'(x)$. Hodnota se bude měnit pouze v závislosti na tlumící funkci $\Phi(x)$. Výsledek komprese je funkce:

$$I(x) = C + \int_0^x G(x)dx, \quad (2.23)$$

která se získá integrací funkce $G(x)$. C je konstanta. Nakonec se hodnoty $I(x)$ umocní z důvodu navrácení jasu. Celý proces je znázorněn na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 (a) HDR scanline s dynamickým rozsahem 2415:1. (b) $H(x) = \log(\text{scanline})$.

(c) Derivace $H'(x)$. (d) Utlumení derivace $G(x)$. (e) Rekonstrukce $I(x)$, podle rovnice 2.23. (f) LDR scanline $\exp(I(x))$ s novým DR 7,5:1. Převzato z [16].

Fotografie je dvojrozměrná, je tedy potřeba přistupovat k HDR pomocí gradientu $\nabla H(x,y)$ namísto derivace $H'(x)$.

$$G(x,y) = \nabla H(x,y) \times \Phi(x,y) \quad (2.24)$$

Obraz I nelze v této situaci získat pouhým integrováním. Gradient musí splňovat podmínku rovnice 2.25, která je u $G(x,y)$ zřídka kdy splněna.

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial x} \quad (2.25)$$

Je proto použita metoda nejmenších čtverců k vyhledání nejbližší podobné funkce. Funkce by měla minimalizovat integrál:

$$\iint F(\nabla I, G) dx dy, \quad (2.26)$$

kde

$$F(\nabla I, G) = \|\nabla I - G\|^2 = \left(\frac{\partial I}{\partial x} - G_x\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y} - G_y\right)^2. \quad (2.27)$$

Funkce $I(x,y)$ musí splňovat Eulerovu-Lagrangeovu rovnici 2.28 v souladu s variančním principem.

$$\frac{\partial F}{\partial I} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial I_x} - \frac{d}{dy} \frac{\partial F}{\partial I_y} = 0 \quad (2.28)$$

Substitucí za F :

$$2 \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{\partial G_x}{\partial x} \right) + 2 \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \frac{\partial G_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (2.29)$$

vydělením 2 a přeskupením proměnných dostaneme Poissonovu rovnici

$$\nabla^2 I = \text{div} G, \quad (2.30)$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor definovaný jako:

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (2.31)$$

a $\text{div} G$ je divergence vektorového pole definovaná jako:

$$\text{div} G = \frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{\partial G_y}{\partial y} \quad (2.32)$$

Řešením Poissonovy rovnice se získá obraz I , jehož gradient bude nejlépe odpovídat G .

Tlumicí funkce $\Phi(x)$.

Požadavek na tlumicí funkci je, aby byl efekt progresivní. Musí se použít víceúrovňové hledání hran pro všechny významné přechody jasu na různých rozlišeních. Nalezený útlum je pak aplikován na snímek s plným rozlišením, čímž se omezí nežádoucí „halo“ efekt.

Prvním krokem je sestavení Gaussovy pyramidy H_k , kde k je počet úrovní H_0, H_1, \dots, H_d , přičemž H_0 je snímek s nejvyšším rozlišením a H_d je snímek s nejnižším

rozlišením. Výška nebo šířka je nejméně 32 pixelů. Gradienty se na každé úrovni pyramidu spočítají pomocí centrálních rozdílů:

$$\nabla H_k(x, y) = \left(\frac{H_k(x+1, y) - H_k(x-1, y)}{2^{k+1}}, \frac{H_k(x, y+1) - H_k(x, y-1)}{2^{k+1}} \right), \quad (2.33)$$

kde pro každou úroveň k , určenou velikostí gradientu, se vypočítá tlumicí faktor $\varphi_k(x, y)$ každého pixelu pomocí rovnice:

$$\varphi_k(x, y) = \frac{\alpha}{\|\nabla H_k(x, y)\|} \cdot \left(\frac{\|\nabla H_k(x, y)\|}{\alpha} \right)^\beta, \quad (2.34)$$

kde se vlastnost tlumení ovládá pomocí koeficientů α a β . Parametr α určuje hladinu, nad kterou jsou gradienty ztlumovány. Parametr β určuje míru ztlumení. Experimentálně bylo zjištěno nejvhodnější nastavení parametrů $\alpha = 0.1$ a β mezi hodnotami 0.8 a 0.9. Výpočet tlumicí funkce od nejnižší úrovně po nejvyšší pomocí $\varphi_k(x, y)$, lze popsat jako:

$$\Phi_d(x, y) = \varphi_d(x, y), \quad (2.35)$$

$$\Phi_k(x, y) = L(\Phi_{k+1})(x, y) \varphi_k(x, y), \quad (2.36)$$

$$\Phi(x, y) = \Phi_d(x, y), \quad (2.37)$$

kde d je úroveň nejnižšího rozlišení, $\Phi(x, y)$ označuje velikost útlumu k -té úrovně a L je lineární interpolace, která se zvyšuje na dvojnásobek. Ze všech úrovní se vypočte výsledná hodnota $\Phi_k(x, y)$ pro každý pixel. Pyramidový výpočet zaručuje nalezení všech gradientních změn nezávisle na velikosti snímku.

2.4.2 Metoda Durand (bilaterální filtrování) [13]

Tato metoda snižuje kontrast při zachování detailů. Využívá rozložení do dvou vrstev - základní vrstvy ve velkém měřítku a vrstvy detailů. Pouze v základní vrstvě se redukuje kontrast. Využije se filtr k zachování okrajů. Detail je v této metodě důležitá informace, která by měla být zachována.

Bilaterální filtrování a robustní statistika:

V této metodě se přepracovalo bilaterální filtrování v rámci robustní statistiky, která se týká odhadů citlivosti odlehklých hodnot. Poskytuje tím široký teoretický rámec bilaterálního filtrování vztahujícího se k anizotropní difuzi.

Zrychlení bilaterálního filtru:

Využívá se dvou zrychlujících metod. Linearizování bilaterálního filtru - což umožní použití Rychlé Fourierovy transformace (FFT) a rychlé konvoluce.

Nejistota:

Počítá se nejistota výstupu filtru, která umožňuje korekci chybných hodnot.

Kontrastní redukce:

Pro zobrazení HDR obrazu na standardním zobrazovači se použije bilaterální filtrování. Nevyžaduje nastavení dalších parametrů.

Základní vrstva se získá za využití bilaterálního filtru. Jedná se o nelineární filtr, kde se váha každého pixelu vypočte pomocí Gaussovy funkce vynásobené funkcí

intenzity, která snižuje váhu pixelů s velkými rozdíly intenzit. Metoda potlačuje „halo“ efekt způsobený použitím Gaussovy funkce. Využívá bilaterální filtrování po částech pomocí lineární aproximace v oblasti intenzity s vhodným vzorkováním, což má za následek zrychlení o dva řády.

Anizotropní difuze:

Je inspirovaná interpretací Gaussova rozostření na parciální diferenciální rovnici vedení tepla.

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -\Delta I \quad (2.38)$$

Intenzita I každého pixelu je zde považovaná za teplo a předána dalším 4 sousedním pixelům v čase. Byla představena, pro zastavení šíření tepla, funkce g , která brání přenosu tepelného toku přes hrany.

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div} [g(\|\nabla I\|)\nabla I]. \quad (2.39)$$

Navrhnuty jsou dvě funkce $g(x)$:

$$g_1(x) = \frac{1}{1+\frac{x^2}{\sigma^2}} \quad \text{a} \quad g_2(x) = e^{-\left(\frac{x^2}{\sigma^2}\right)}, \quad (2.40)$$

kde parametr σ je měřítko intenzity, který určuje gradient intenzity zastavení šíření.

Diskrétní řídicí rovnice hodnoty I_s závislá na pixelu s , je potom:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{4} \sum_{p \in \text{neighb}_4(s)} g(I_p^t - I_s^t) (I_p^t - I_s^t), \quad (2.41)$$

kde t představuje časový krok, a $\text{neighb}_4(s)$ jsou 4 sousedící pixely s pixelem s . λ je skalár, který určuje rychlost difuze.

Anizotropní difuze je populární nástroj pro zachování hran. Jeho diskrétní difuzní vlastnost má však vliv na rychlost samotného procesu. Navíc výsledky závisí na době zastavení procesu.

V roce 1998 byla přepracována anizotropní difuze v rámci robustních statistik. Principem je odhad hodnoty pixelu s z hodnot 4 sousedních pixelů, což minimalizuje energii na celém obraze pomocí funkce:

$$\min \sum_{s \in \Omega} \sum_{p \in \text{neighb}_4(s)} \rho(I_p - I_s), \quad (2.42)$$

kde Ω celý obraz a ρ je norma chyby (např. kvadratická). Rovnice 2.25 lze vyřešit sestupným gradientem pro každý pixel:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{4} \sum_{p \in \text{neighb}_4(s)} \psi(I_p - I_s), \quad (2.43)$$

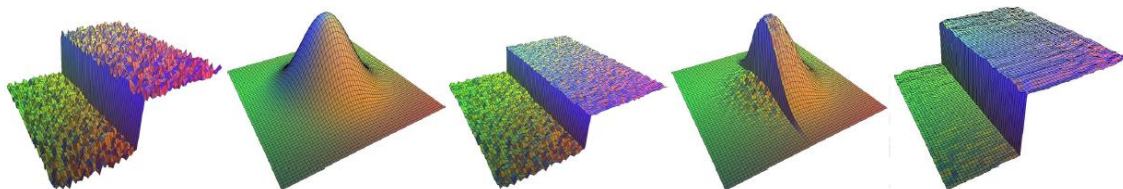
kde ψ je derivace ρ a t je diskrétní časová proměnná. ψ je úměrná tzv. vlivové funkci $g_\sigma(x)$, která charakterizuje vliv vzorku na odhad.

Bilaterální filtrace vznikla jako alternativa k anizotropní difuzi. Jedná se o nelineární filtr, kde je výstup váženým průměrem vstupu. Nejprve se použije standardní Gaussov filtr s prostorovým jádrem f (kernel). Váha každého pixelu záleží na funkci g v oblasti intenzity. Výstupem pro pixel s bilaterálního filtru je:

$$I_s = \frac{1}{k(s)} \sum_{p \in \Omega} f(p - s) g(I_p - I_s) I_p, \quad (2.44)$$

kde $k(s)$ je normalizační člen.

$$k(s) = \sum_{p \in \Omega} f(p - s) g(I_p - I_s). \quad (2.45)$$



Obrázek 2.6 První obrázek zleva je vstup, druhý je prostorové jádro filtru f , prostřední je funkce g v oblasti intenzity pro centrální pixel, druhý zprava je váha $f * g$ pro centrální pixel a poslední je výstup po bilaterálním filtrování. Převzato z [13].

V praxi se použije Gaussův filtr pro f v prostorové doméně a Gaussův filtr pro g v oblasti intenzity. Hodnota pixelu s je pak hlavně ovlivněna pixely, které jsou blízko prostorově a mají podobnou intenzitu viz obrázek 2.6. Metoda se dále zabývá použitím robustního statistického odhadu k vyhlazování okrajů.

Metoda rozšiřuje anizotropní difuzi 0-řádu na větší prostorovou podporu pomocí funkce:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \lambda \sum_{p \in \Omega} f(p - s) g(I_p^t - I_s^t) (I_p^t - I_s^t), \quad (2.46)$$

kde f je prostorová váhová funkce (typicky Gaussova), Ω je celý obraz, a t je diskrétní časová proměnná.

V případě, že je g rovnoměrná a kde f je prostorová váhová funkce Gaussovy rovnice 2.46, provádí se gaussové rozostření pro každou iteraci. Je zde ale problém při anizotropní filtraci, která převádí záření přes hrany.

Anizotropní difuze a bilaterální filtrování patří do stejné skupiny odhadů, můžou se tedy porovnat. Oba respektují kauzalitu: nelze vytvářet žádné maximum ani minimum, pouze se odstraní. Anizotropní difuze je adiabatická (zachovává energii), zatímco bilaterální filtrace není. Bilaterální filtrace je plynulá a není náchylná na tvorbu schodišťového efektu (kostičkování obrazu). Dále se metoda zabývá zrychlováním procesu za pomoci rychlé Fourierovy transformace.

2.4.3 Reinhardova lokální metoda [35].

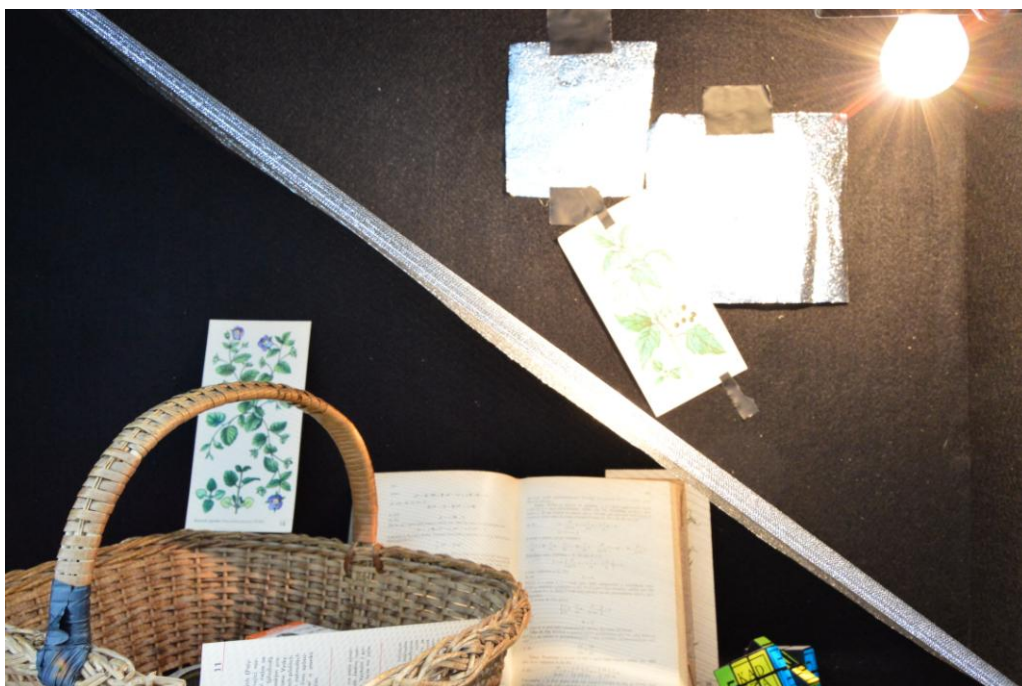
Podstata metody je popsána v kapitole 2.3.2. Lokální Reinhardova metoda pracuje s nenulovou hodnotou váhového parametru a .

3 IMPLEMENTACE

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na sestavení laboratorního pracoviště, poskytující scénu s vysokým dynamickým rozsahem světla a následného snímání a zpracování snímků s vysokým dynamickým rozsahem.

3.1 Koncepce pracoviště

Ke snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem je zapotřebí vytvořit umělé pracoviště, které bude obsahovat dostatečný dynamický rozsah. Musí tedy obsahovat zdroj světla, který bude vytvářet maximální hodnoty jasu. Pro laboratorní účely postačí klasická žárovka. Pro zaznamenání detailů postačí např. proutěný koš. Snímaný prostor by měl mít rozměry odpovídající poměru stran snímáče 3:2, tedy například 1m na 0,66m.



Obrázek 3.1 Pracoviště s umělým osvětlením

Ke snímání umělé scény je zapotřebí kvalitního fotoaparátu se stativem a vhodným objektivem. V dnešní době patří mezi nejkvalitnější fotoaparáty digitální zrcadlovky. Značná výhoda oproti kompaktním fotoaparátům je optický hledáček, který umožňuje vidět snímání přirozený obraz, velká nabídka příslušenství a hlavně další řada manuálních funkcí, které kompaktní fotoaparáty postrádají. Z hlediska poměru cena/výkon se při sestavování pracoviště výběr zúžil na dva typy fotoaparátu, a to CANON EOS 600D a NIKON D3200. S ohledem na pořizovací cenu a rozlišovací schopnosti byla vybrána digitální zrcadlovka NIKON D3200 [36] se setovým objektivem 18-55 mm, který byl doporučen i profesionálním fotografem Pavlem

Nesvadbou².

Zrcadlovka Nikon D3200 má vlastnosti odpovídající potřebám pro snímání kvalitních fotografií, které jsou nezbytné pro tvorbu HDR snímků. Základní vlastností fotoaparátu je rozlišení obrazového snímače CMOS formátu DX dosahující 24,2 megapixelů – rozlišení fotografie 6000x4000 obrazových bodů, korekce expozice ± 5 EV po 1/3 EV, možnost připojení PC s programem podporujícím automatický expoziční bracketing. Výstupní formát snímků je NEF (RAW): 12 bitů na vzorek a formát JPEG.



Obrázek 3.2 Fotoaparát Nikon D3200 se setovým objektivem 18 – 55 mm.

Vybraný model má jednu nevýhodu, která omezuje fotografovat scénu okamžitě s automatickou změnou expozice. Nemá vlastnost automatického expozičního bracketingu, tento nedostatek je však snadno řešitelný za použití pomocného volně dostupného programu qDslrDashboard [33] pro ovládání zrcadlovek Nikon a Canon z počítače, tabletu či telefonu.

3.1.1 qDslrDashboard [33]

qDslrDashboard je multiplatformní aplikace pro ovládání fotoaparátů Nikon, Canon a Sony. Používá PTP a PTP/IP protokol ke komunikaci s DSLR fotoaparáty. V současné době je k dispozici pro platformy Android, iOS, Linux, OSX a Windows. Pro Linux, OSX a Windows je aplikace zdarma.

Aplikace je napsaná v jazyce C++ pomocí Qt Framework. Využívá knihovnu OpenCV pro zpracování obrazu, libRaw knihovny pro zpracování RAW snímků a libusb pro USB komunikaci.

qDslrDashboard podporuje připojení několika zrcadlovek najednou. Spojení s fotoaparátem může být vytvořeno následujícími metodami:

USB – fotoaparát je připojen pomocí kabelu USB k počítači nebo zařízení Android (na zařízeních Android je potřeba připojení přes USB ITG adaptér.)

Network (počítačová síť) – užívá DslrDashboardServer (ddserver) pracující na

² <http://www.photonesvadba.com/>

OpenWrt routeru nebo další instanci qDslrDashboard běžící na jiném zařízení.

Wireless (bezdrátově) – při použití Nikonu WU-1a/1b a Nikonu spojeného bezdrátově, Canon WFT a Sony fotoaparáty se zabudovanou bezdrátovou aplikací PlayMemories ‘Smart Remote Control’.

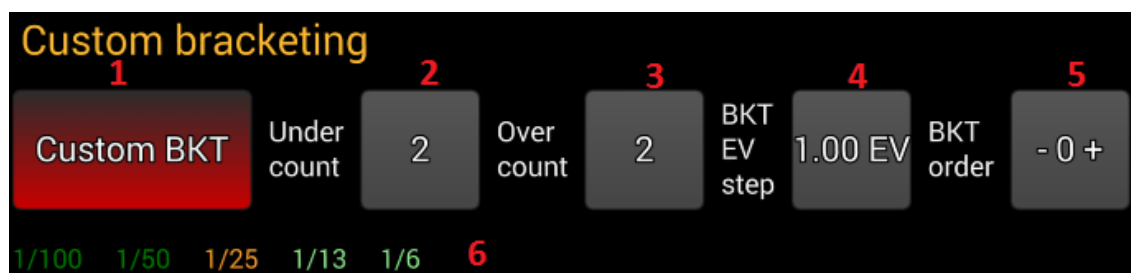
Některé vlastnosti qDslrDashboard – změny vlastností a nastavení fotoaparátu, iniciace zachycování snímků, živý náhled, nahrávání video sekvencí, prohlížeč lokálních snímků a obrázků umístěných na kartě SD fotoaparátu, bracketing v manuálním a automatickém režimu, intervalový časovač a snímání timelaps (časosběr).

V pracovišti bude využito programu qDslrDashboard k nastavení fotoaparátu Nikon D3200 na hodnoty ISO 100, f – nejnižší možné, nastavení na M – manuální nastavení a nastavení fotografování pomocí funkce bracketing – postupného pořízení fotografií s krokovou změnou expozičních hodnot. Připojení se provede pomocí USB.



Obrázek 3.3 1 – připojení pomocí USB kabelu k počítači. Převzato z [33].

Využije se nastavení Custom BKT viz obrázek 3.4.



Obrázek 3.4 Nastavení bracketingu programu qDslrDashboard. Převzato z [33].

Fotografuje se přes Live view (živý náhled) viz obrázek 3.5.



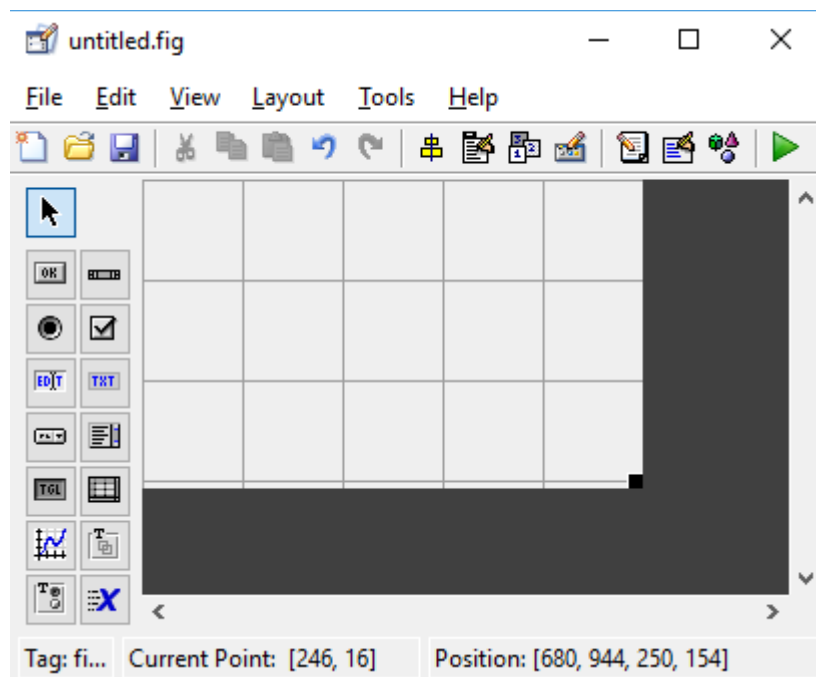
Obrázek 3.5 Živý náhled programu qDslrDashboard. Převzato z [33].

Po nastavení bracketingu se samotné focení po kroku spustí tlačítkem označeným fotoaparátem. Po vyfotografování souboru snímků je možné získané snímky prohlédnout a uložit v galerii fotografií.

3.1.2 Matlab [27].

Matlab (MATrix LABoratory) je interaktivní programovací prostředí a skriptovací programovací jazyk vhodný pro vědecké a inženýrské výpočty, modelování, simulace a vizualizaci dat. Vlastní programovací jazyk vychází z jazyka Fortran. Obsahuje aplikaci na tvorbu grafického uživatelského rozhraní. Autorem MATLABu pro komerční použití je firma The MathWorks, Inc., zástupce pro Českou republiku je firma HUMUSOFT. K systému MATLAB existují i volně šířitelné alternativy jako Octave, Scilab nebo FreeMat.

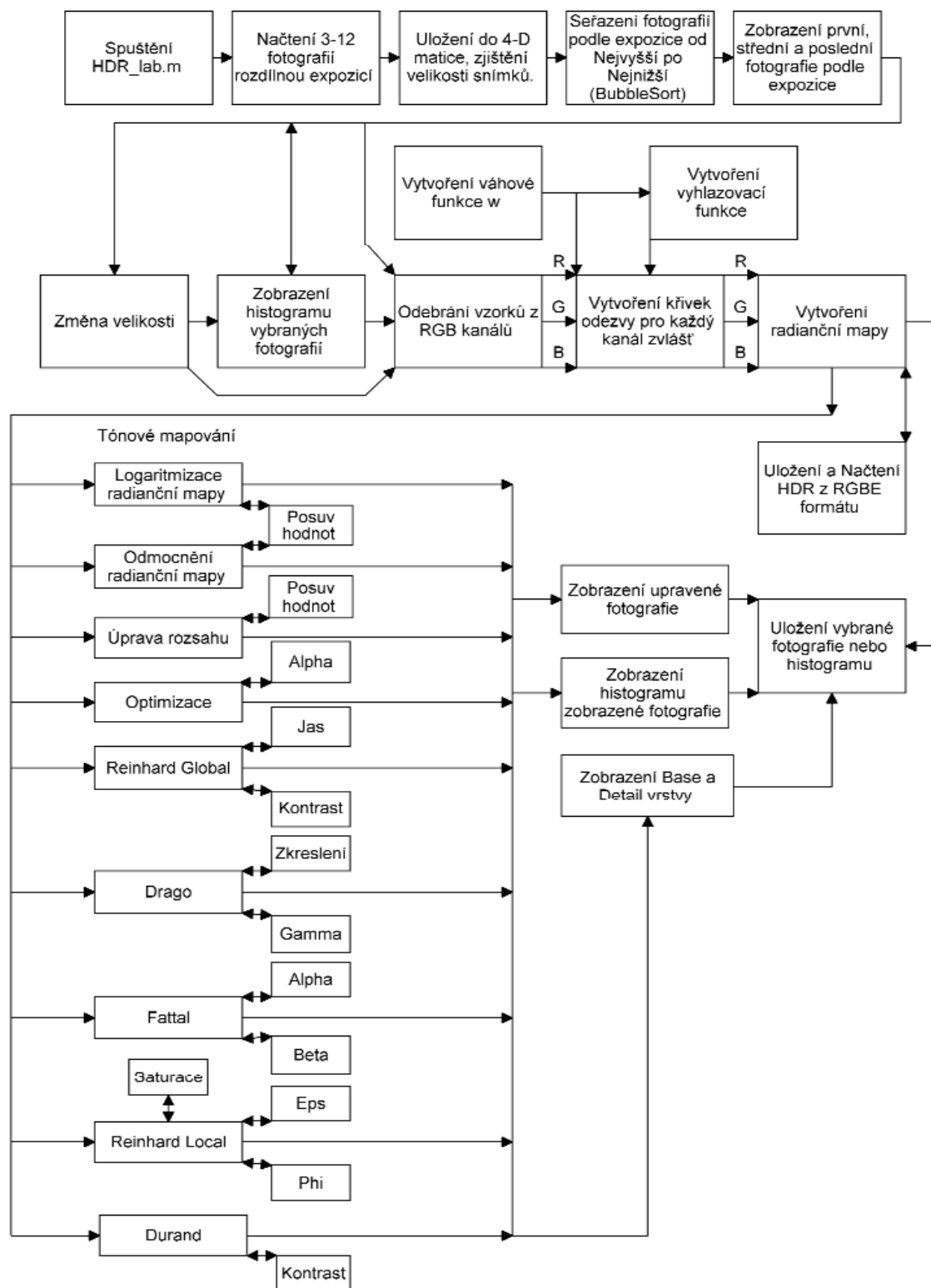
Guide (Graphical User Interface Development Environment) – prostředí, které umožňuje vytvářet aplikace s grafickým rozhraním. Umožňuje vytvářet a editovat uživatelské rozhraní pomocí základních komponent (checkbox, sliders, tables apod.). Vzhled vytvořené GUI aplikace se ukládá do souboru s příponou *.fig a zdrojový kód do souboru s příponou *.m. Spuštění se provádí v základním menu nebo příkazem guide.



Obrázek 3.6 Grafické rozhraní GUI pro tvorbu aplikací programu MATLAB

3.2 Struktura vytvořeného programu HDR_lab

Program se spouští v MATLABu, spuštěním funkce HDR_lab.m.



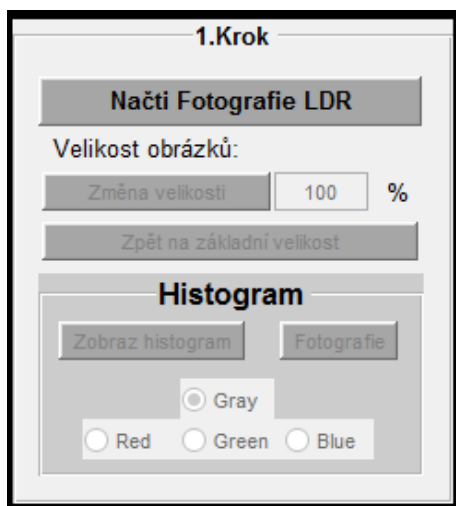
Obrázek 3.7 Vývojový diagram programu HDR_lab

3.3 Popis funkce programu

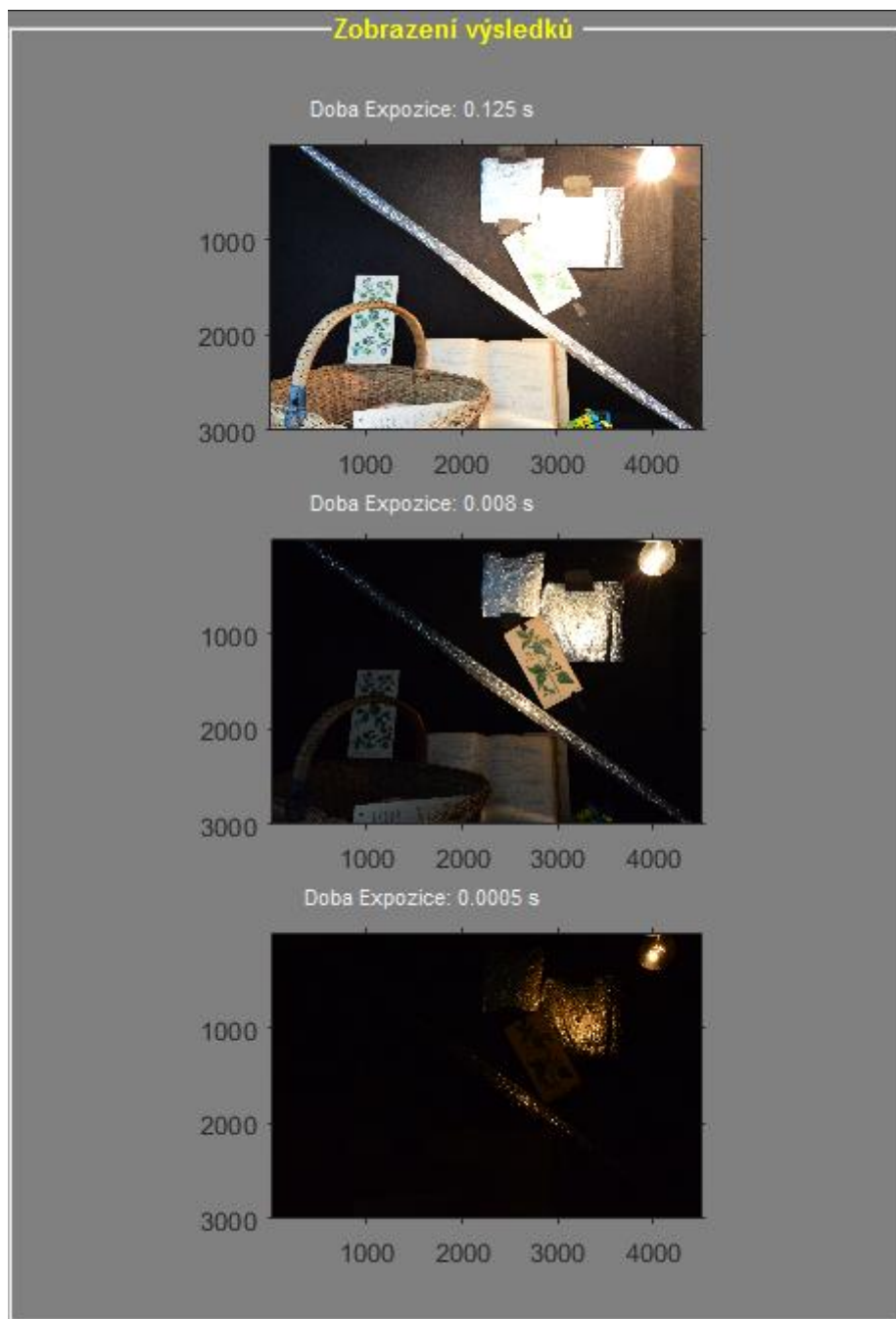
Program HDR-lab umožňuje načtení 3–12 fotografií s rozdílnou expozicí ze souboru s pořízenými fotografiemi pomocí programu qDslrDashboard. Fotografie by měly být statické. Fotografie se seřadí od nejvyššího expozičního času po nejnižší expoziční čas pomocí algoritmu bubblesort. Dál se fotografie načtou do 4D matice, kam se uloží všechny snímky pro další úpravy. Z fotografií se vyjmou tři snímky, první, střední a poslední i s expozičními hodnotami, které se zobrazí v prostoru na pravé straně pro zobrazení výsledků. Snímky se dále mohou zmenšit od 100 do 0,1 procenta, pokud je zapotřebí. Program nyní může zobrazit histogramy jasové složky, červeného kanálu, zeleného kanálu a modrého kanálu všech tří zobrazených fotografií. Dále program umožňuje vytvoření radianční (jasové) mapy za pomoci metody Debevec a Malik. Dalším krokem může být samotné uložení HDR fotografie ve formátu RGBE nebo snížení dynamického rozsahu za pomoci několika výše popsanych metod. U každé metody je možno posuvníky měnit parametry a tím měnit výslednou fotografii. Výsledná fotografie i s jasovým histogramem se zobrazuje v pravé části programu HDR_lab. Všechny fotografie a histogramy se dají dále uložit k dalšímu použití.

3.3.1 Načtení fotografií do HDR_lab

Samotné načtení fotografií získaných za použití qDslrDashboard se provede pomocí tlačítka **Načti fotografie LDR** viz obrázek 3.7, kde se zobrazí klasické okno pro multivýběru 3-12 fotografií. Po načtení se 3 vybrané fotografie zobrazí v pravé části s hodnotami expozičních časů viz obrázek 3.8.

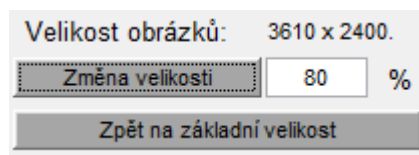


Obrázek 3.8 1. krok programu HDR-lab – načtení fotografií



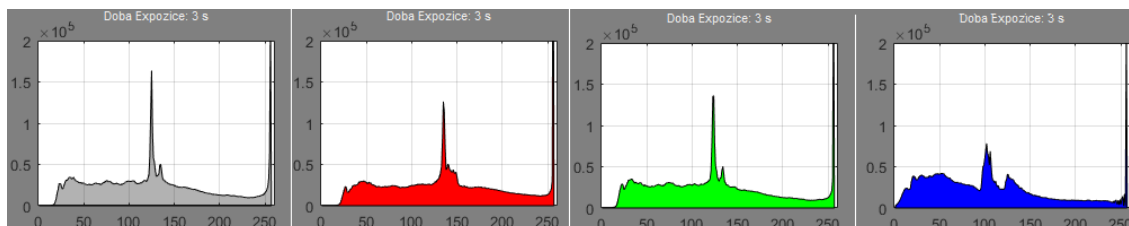
Obrázek 3.9 Plocha pro zobrazování výsledků programu HDR-lab

V kroku 1 je k dispozici možnost zmenšení zpracovávaných fotografií viz obrázek 3.10. Změna velikosti umožňuje změnu velikosti načtených snímků, pokud vyhovují menší výstupní snímky. Vzhledem k obtížnosti metody Fattal využívající velkého množství dat může dojít k chybě a proto se musí opět načtené fotografie zmenšit na potřebnou úroveň. Změna se dá vrátit tlačítkem Zpět na základní velikost. Upravené fotografie se zobrazí opět v pravé části pro Zobrazení výsledků. A Velikost fotografií se zobrazí nad tlačítkem Změna velikosti.



Obrázek 3.10 Změna velikosti s informací o velikosti upravených snímků

První krok umožňuje i zobrazení histogramů jasové složky, červeného kanálu, zeleného kanálu a modrého kanálu jednotlivých zobrazených snímků. Tlačítkem Fotografie je možné opět zobrazit 3 načtené snímky.

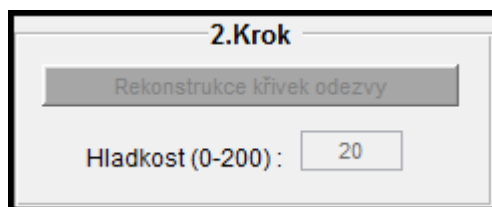


Obrázek 3.11 Zobrazené histogramy v programu HDR-lab zobrazených snímků.

3.3.2 Skládání radianční mapy metodou Debevec & Malik

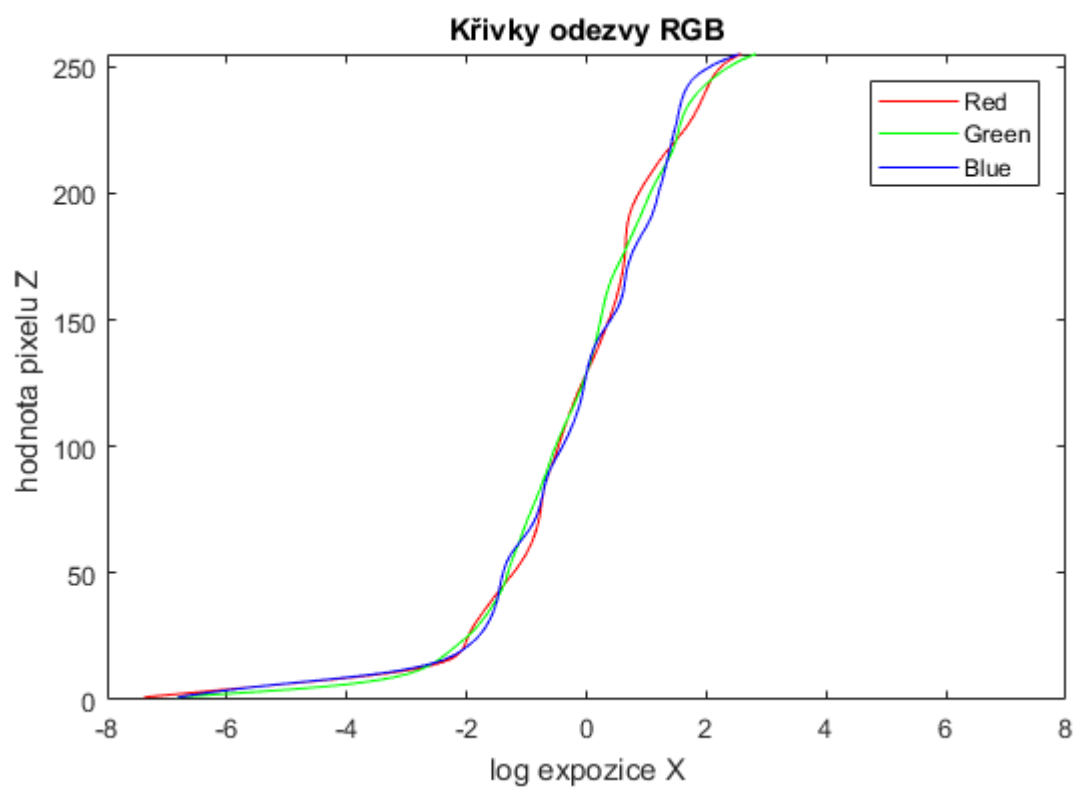
Rekonstrukce křivek odezvy.

Skládání radianční mapy se provede v programu HDR-lab pomocí dvou kroků. Nejdříve se musí vytvořit křivky odezvy pomocí 2. kroku tlačítkem Rekonstrukce křivek odezvy viz obrázek 3.12. Křivky odezvy fotoaparátu, pro každý barevný kanál jednotlivě, se nám následně zobrazí v pravé části programu v oblasti zobrazení výsledků.

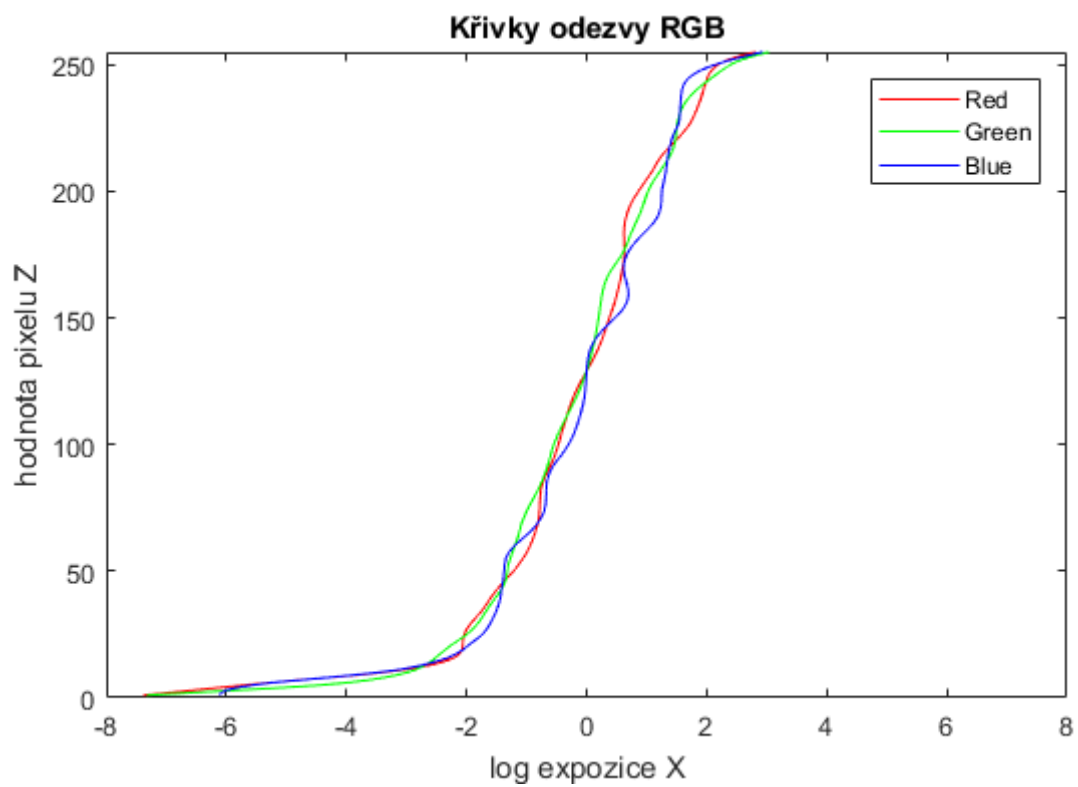


Obrázek 3.12 2. krok programu HDR-lab – Rekonstrukce křivek odezvy

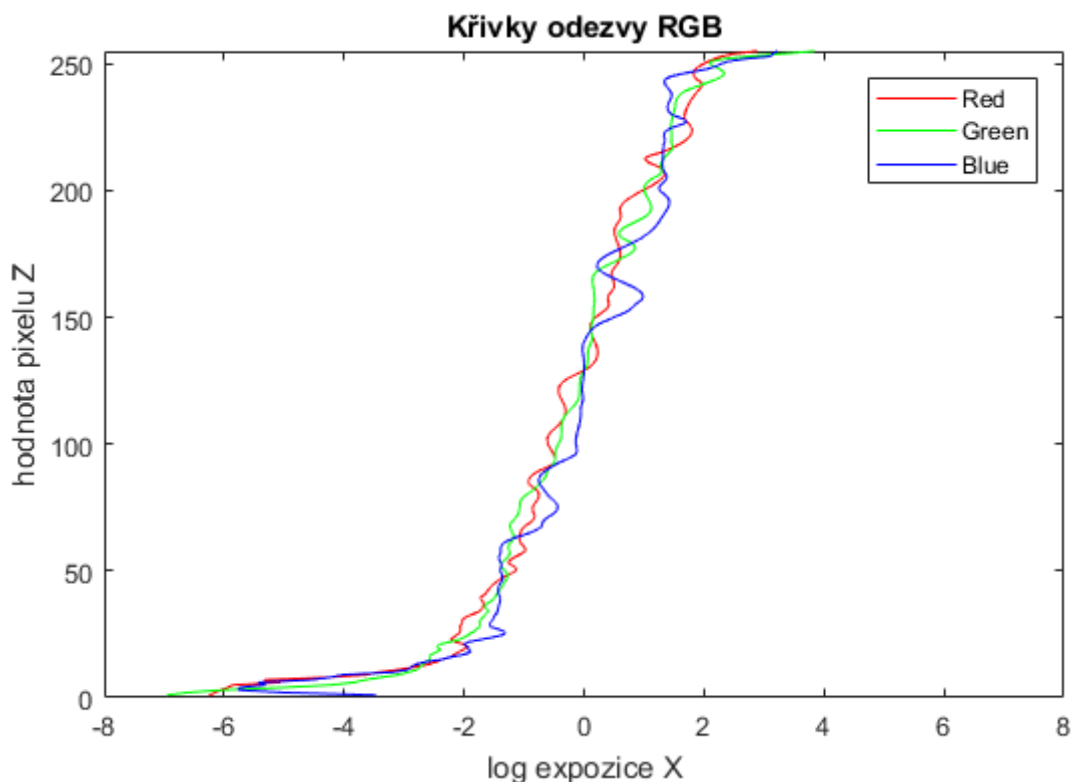
Zde je také možnost upravovat průběh křivek pomocí nastavitelné hodnoty Hladkost. Doporučená hodnota je 20. Je zapotřebí pro další výpočty aby křivky byly co nejvíce vyhlazeny. Obrázky 3.13, 3.14, 3.15 zobrazují výsledky při rozdílných hodnotách parametru Hladkost. Při hodnotě Hladkost = 1 je křivka již značně nelineární na celém rozsahu.



Obrázek 3.13 Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 20



Obrázek 3.14 Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 10



Obrázek 3.15 Křivky odezvy RGB s hodnotou Hladkost = 1

Rekonstrukce radianční mapy.

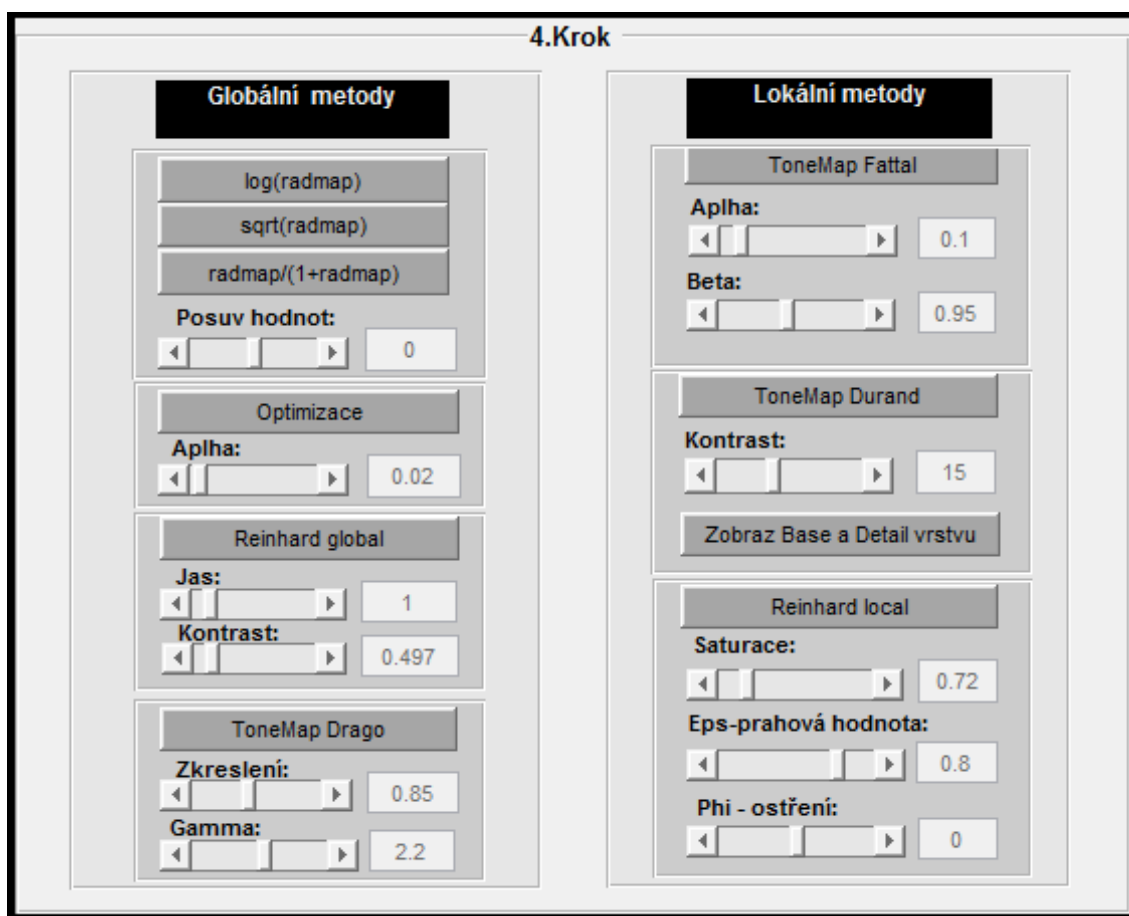
Po vytvoření křivek odezvy se pomocí kroku 3. Rekonstrukce Radianční Mapy viz obrázek 3.16 převedou hodnoty obrazových bodů na relativní hodnoty jasu. Zde se využívá opět váhová funkce Hat, aby se dala větší váha na pixely nacházející se ve středu. Vytvoří se jasová mapa viz obrázek 1.4 s hodnotou v datovém formátu double. V pravé části programu se zobrazí upravená jasová mapa za použití `colormap(jet(256))` a histogram jasové mapy. V informačním poli umístěného ve spodní části programu se od této chvíle začne při použití každé metody tónového mapování vypisovat maximální a minimální hodnota jasové mapy. Nyní je možné jasovou mapu uložit ve formátu RGBE za pomoci části programu Práce se souborem tlačítkem Ulož *.hdr umístěného v dolní části. Pokud existuje HDR fotografie, je možné ji zde načíst a dále s ní pracovat.



Obrázek 3.16 3. krok programu HDR_lab – Rekonstrukce radianční mapy

3.3.3 Využití globálních a lokálních operátorů

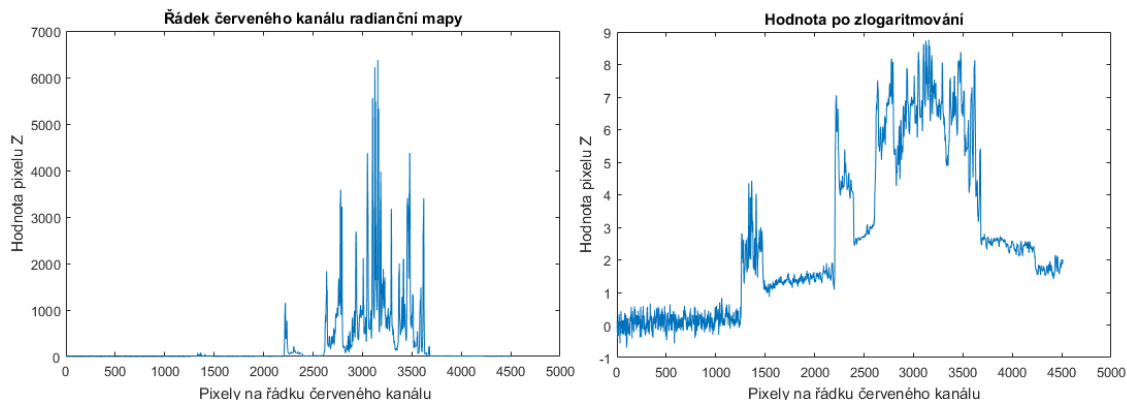
Ve 4 kroku jsou použity některé metody pro tónové mapování za pomoci globálních a lokálních operátorů viz obrázek 3.17. Algoritmy byly převážně převzaty z HDR Toolbox for Matlab [18]. Každý operátor má možnost další úpravy pomocí posuvníků. Hodnoty se nedají měnit jinak než pohybem posuvníků, aby se předešlo zbytečným chybám. Po vytvoření snímku za pomoci jedné z metod se v informačním řádku vypíše popis funkce operátoru, rozsah radianční mapy a rozsah upraveného snímku. V pravé části programu se zobrazí zrekonstruovaný snímek a jeho histogram. Po vytvoření snímku a histogramu u každého jednotlivého operátoru je možno snímek i histogram uložit. Do té doby jsou místa v paměti, kam se ukládají upravené snímky prázdné.



Obrázek 3.17 4. krok programu HDR_lab Globální a Lokální metody

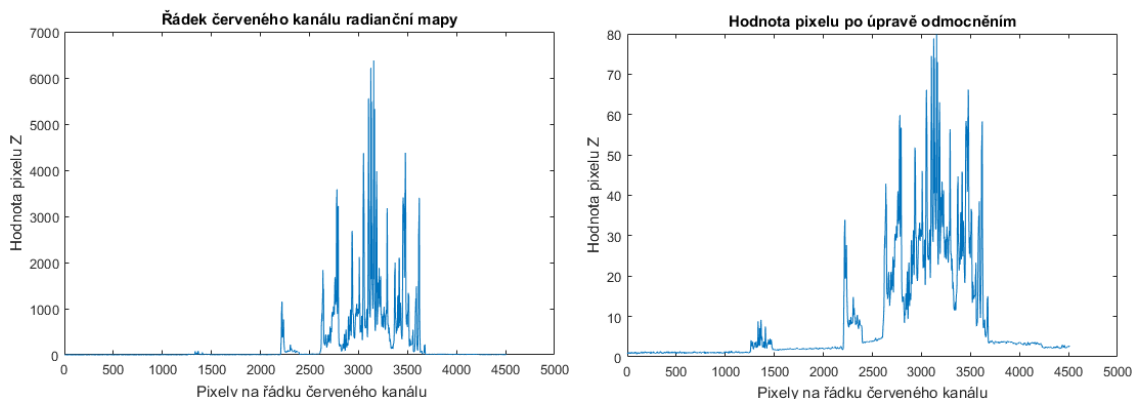
Globální metody

Log(radmap) – jednoduchý globální operátor logaritmus je použit na celou jasovou mapu. Posuvníkem Posuv hodnot je možné všechny výsledné hodnoty snížit nebo zvýšit o krok 0,1. Tím dochází k zesvětlení nebo ztmavení výsledného snímku. Úprava pomocí logaritmizace je patrná v obrázku 3.18.



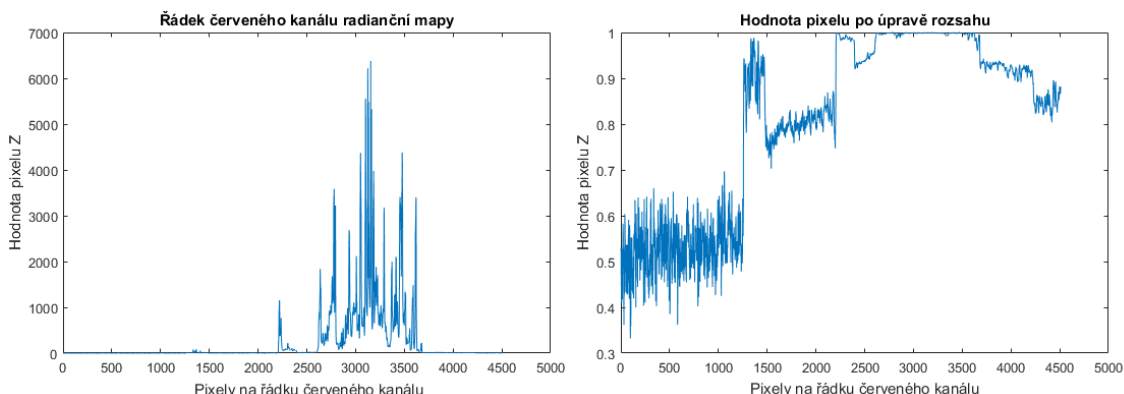
Obrázek 3.18 Použití logaritmizace na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy

Sqrt(radmap) – jednoduchý globální operátor odmocnění. Je použit na celou jasovou mapu. Posuvníkem Posuv hodnot je možné všechny výsledné hodnoty snížit nebo zvýšit o krok 0,1. Tím dochází k zesvětlení nebo ztmavení výsledného snímku. Úprava pomocí odmocnění je patrná v obrázku 3.19.



Obrázek 3.19 Použití odmocnění na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy

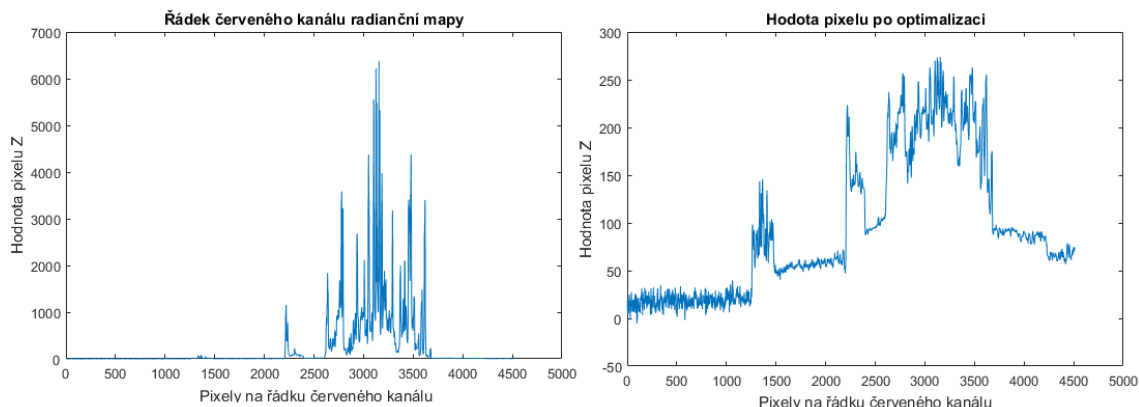
Radmap/(1+Radmap) – jednoduchý operátor, který umožňuje rozsah převést do hodnot od 0 do 1. Úprava je patrná v obrázku 3.20



Obrázek 3.20 Použití úpravy rozsahu na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy

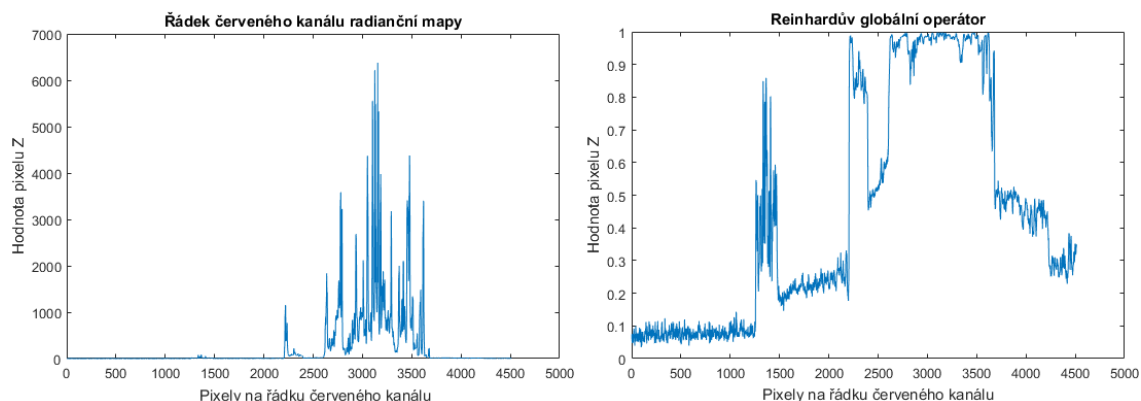
Optimalizace – Předěšlá metoda úpravy rozsahu je zde rozšířena o zlogaritmování,

vložení proměnného operátoru a změnu rozsahu na hodnotu od 0 do 255. Úprava je patrná v obrázku 3.21.



Obrázek 3.21 Použití Optimalizace na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy

Reinhardův globální operátor – nejdříve převádí jasovou mapu na jasové hodnoty pomocí vzorce 2.13. Zjistí se počet pixelů v jasové mapě k dalšímu použití při výpočtu tzv. klíče. Klíč (key) je průměrný logaritmický subjektivní jas, který přibližně vnímá člověk. Jeho hodnoty se pohybují okolo 0.3. Jas se dále přepočítá díky nastavené hodnotě Jas (hodnota vložená uživatelem) / klíč vynásobené jasem jasové mapy. Všechny jasové hodnoty se následně převedou do rozsahu [0,1]. Výsledný snímek získáme dělením každého kanálu RGB jasové mapy jasovou složkou radianční mapy na kontrast (hodnota vložená uživatelem). Takto zpracované hodnoty pro každý kanál RGB se nakonec vynásobí nově vypočítanými jasovými hodnotami. Rozsáhlejší popis metody je v kapitole 2.3.2.



Obrázek 3.22 Použití Reinhardova globálního operátoru na jeden řádek červeného kanálu jasové mapy.

ToneMap Drago – Operátor Drago využívá adaptivní logaritmické mapování. Prvním krokem se převedou hodnoty jasové mapy na hodnoty XYZ pomocí vzorců 3.1, 3.2, 3.3 [41] a následně na hodnoty Y_{xy} pomocí vzorců 3.4 se kterými se dále pracuje.

$$x = (0.412453 \cdot \text{radMapR}) + (0.357580 \cdot \text{radMapG}) + (0.180423 \cdot \text{radMapB}) \quad (3.1)$$

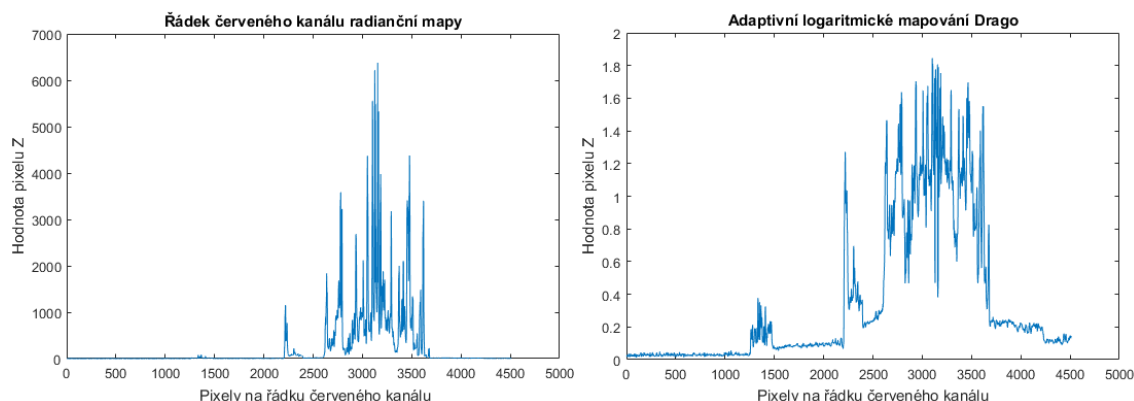
$$y = (0.212671 \cdot \text{radMapR}) + (0.715160 \cdot \text{radMapG}) + (0.072169 \cdot \text{radMapB}) \quad (3.2)$$

$$z = (0.019334 \cdot \text{radMapR}) + (0.119193 \cdot \text{radMapG}) + (0.950227 \cdot \text{radMapB}) \quad (3.3)$$

Hodnoty XYZ se dál převedou na hodnoty Yxy pomocí

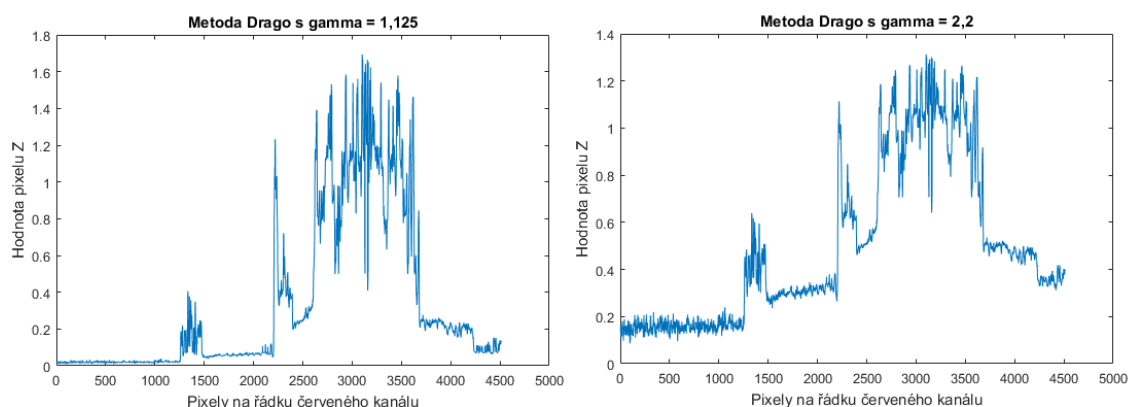
$$W = \text{sum}(z), Y = y, x = x/W, y = y/W, \quad (3.4)$$

kde Y je Jasová složka, která se dále upraví pomocí vzorce 2.19. Hodnota *bias* je zadáná uživatelem pomocí posuvníku zkreslení. Dalším krokem se hodnoty převedou zpět na hodnoty *RGB*.



Obrázek 3.23 Použití operátoru Drago na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.

Hodnoty RGB se upraví pomocí korekce gamma vzorec 2.21, která se dá nastavit uživatelem pomocí posuvníku gamma. Použití korekce gamma je patrná v obrázku 3.24.



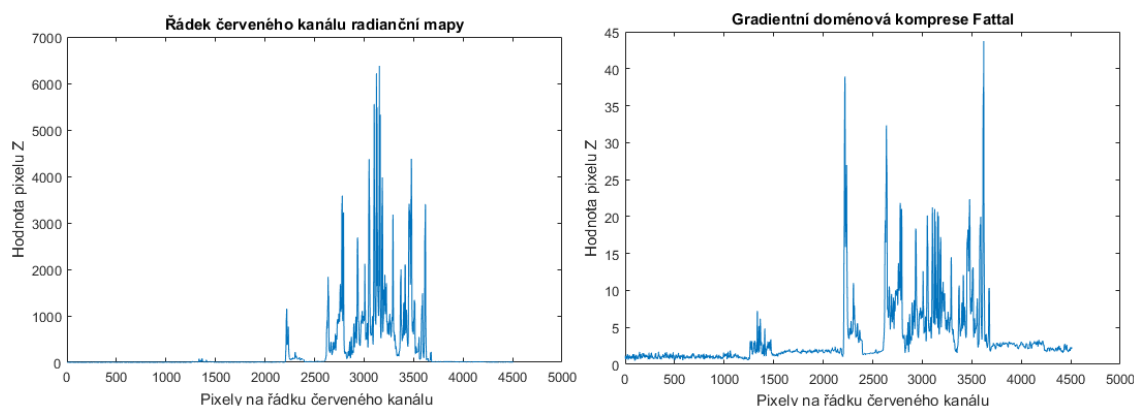
Obrázek 3.24 Použití korekce gamma na jeden řádek červeného kanálu jasové mapy. Vlevo je nastavena hodnota gamma = 1,125, vpravo je nastavena na hodnotu gamma = 2,2.

Lokální metody

Tonemap Fattal [34] – metoda využívá několik funkcí `FattalTMO.m`, `FattalPhi.m`, `PoissonSolver.m` a `ChangeLuminance.m`.

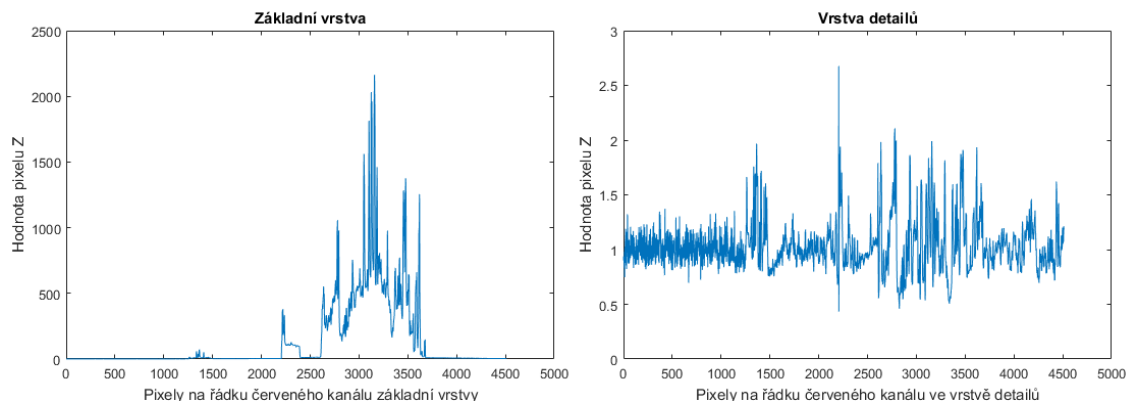
Metoda pracuje s jasovou složkou radianční mapy, která se vypočte pomocí rovnice 2.13. Jasová složka se zlogaritmuje. Vypočítá se Gaussova pyramida složená z 1 až $d+1$ obrazů, kde $d+1$ označuje obraz s nejnižším rozlišením. Poté se vypočítá ke každému obrazu pyramidu gradient pomocí rovnice 2.33, který se dosadí do rovnice 2.34. Vytvoří se maska útlumu na základě vysokých hodnot gradientu. Spočítá se tlumící funkce gradientu $\Phi(x,y)$, která v další fázi ztlumí velikost gradientu na

požadovanou úroveň. Požadované úrovně se dají nastavit pomocí posuvníků α a β . Parametr α určuje hranici přechodu mezi velkou a slabou intenzitou. Větší parametry než je $\alpha = 1$ se utlumí. Parametru β odpovídá množství útlumu. Vynásobením tlumící funkce $\Phi(x,y)$ a gradientu ∇H vstupního jasu se získá ztlumený gradient G . Další krok vypočítá divergenci ztlumeného gradientu G . Dalším krokem je řešení Poissonovy rovnice 2.32. Nakonec se nalezený obraz I převede do lineární podoby. Radianční mapa, jas a vypočtený nový jas vstoupí do funkce `ChangeLuminance.m`, kde se výsledný obraz vypočte vynásobením starého obrazu novou hodnotou jasu a následně se podělí starou hodnotou jasu pro každý kanál RGB zvlášť. Proces je znázorněn v obrázku 2.5. Použití metody Fattal je zobrazen v obrázku 3.25.

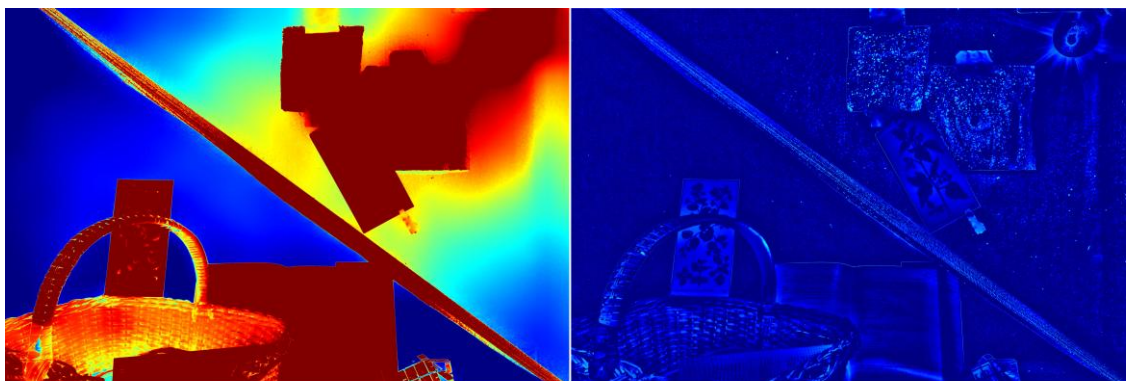


Obrázek 3.25 Použití operátoru Fattal na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.

Tonemap Durand – pracuje s jasovou složkou, kterou rozdělí na dvě vrstvy pomocí bilaterálního filtru. Vrstvu základní a vrstvu detailů viz obrázek 3.26. a 3.27.



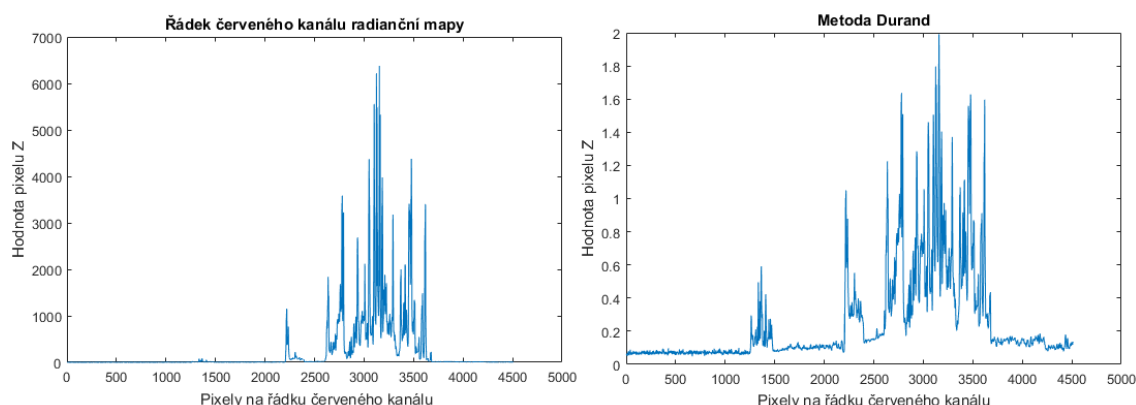
Obrázek 3.26 Jeden řádek radianční mapy červeného kanálu rozdělený pomocí Bilaterálního filtrování na dvě vrstvy. Vlevo základní vrstva a vpravo vrstva detailů.



Obrázek 3.27 Vlevo zobrazena základní vrstva. Vpravo zobrazena vrstva detailů.

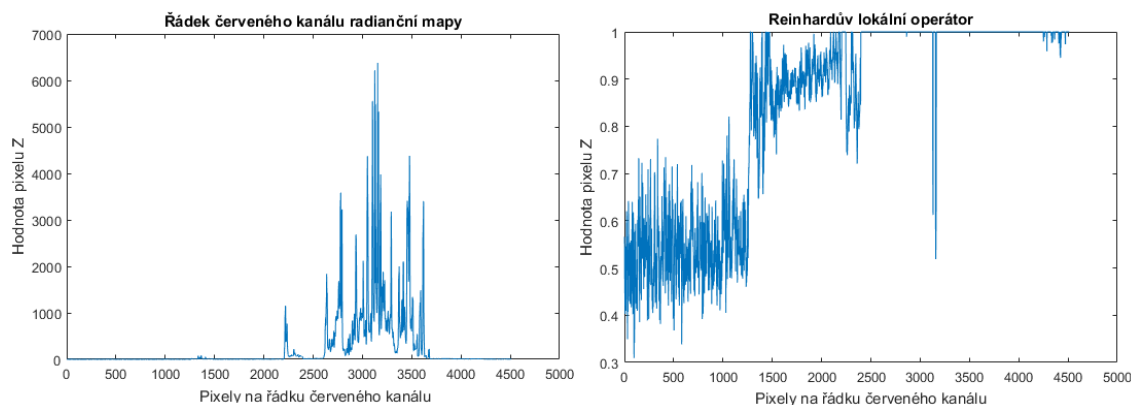
Vrstvy se dále zlogaritmují, vypočítá se kompresní faktor, kterým se vynásobí základní zlogaritmovaná vrstva. K takto upravené vrstvě se přičte zlogaritmovaná vrstva detailů. Odečte se absolutní hodnota logaritmu, která se vypočte jako kompresní faktor násobený maximální hodnotou zlogaritmované základní vrstvy.

Výsledný upravený snímek se dá upravovat pomocí posuvníku Kontrast. Při stlačení tlačítka Zobraz Base a Detail vrstvu, se zobrazí obrázky 3.27. Použití metody Durand je zobrazen v obrázku 3.28.



Obrázek 3.28 Použití operátoru Durand na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy.

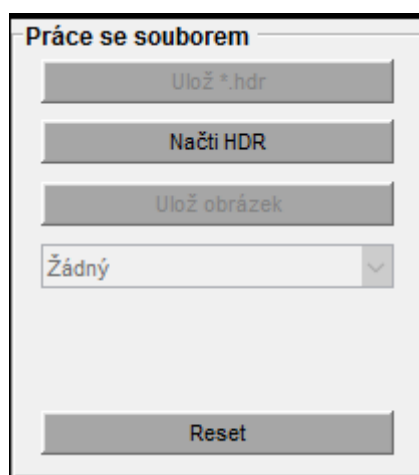
Reinhard local – nejdříve vypočítá jasovou složku jasové mapy pomocí rovnice 2.13. Následně se vypočítá devětkrát gaussův filtr radianční mapy. Na každý obrázek je použit standartní gaussův filtr s koeficientem vždy o 1.6 krát větší než předchozí. Vypočítá se rovnice 2.7 pro parametr $\alpha_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \approx 0,35$. Parametr α_2 je pak 1.6 krát větší. Přidanými posuvníky můžeme měnit Saturaci, prahovou hodnotu ε z rovnice 2.10 a hodnotu ostření Φ z rovnice 2.9. Výsledná maska se použije na jasovou složku jasové mapy. Získá se nová jasová složka. Výsledný snímek získáme podělením každého kanálu RGB jasové mapy jasovou složkou radianční mapy na saturaci (hodnota vložená uživatelem). Takto zpracované hodnoty pro každý kanál RGB se nakonec vynásobí nově vypočítanými jasovými hodnotami. Maximální hodnoty se upraví na hodnotu 1, jak je patrné u obrázku 3.29.



Obrázek 3.29 Použití Metody Reinhard Local na jeden řádek červeného kanálu radianční mapy

3.3.4 Práce se souborem

Dalším krokem je uložení vytvořených fotografií a histogramů. Využije se části **Práce se souborem** viz obrázek 3.30.

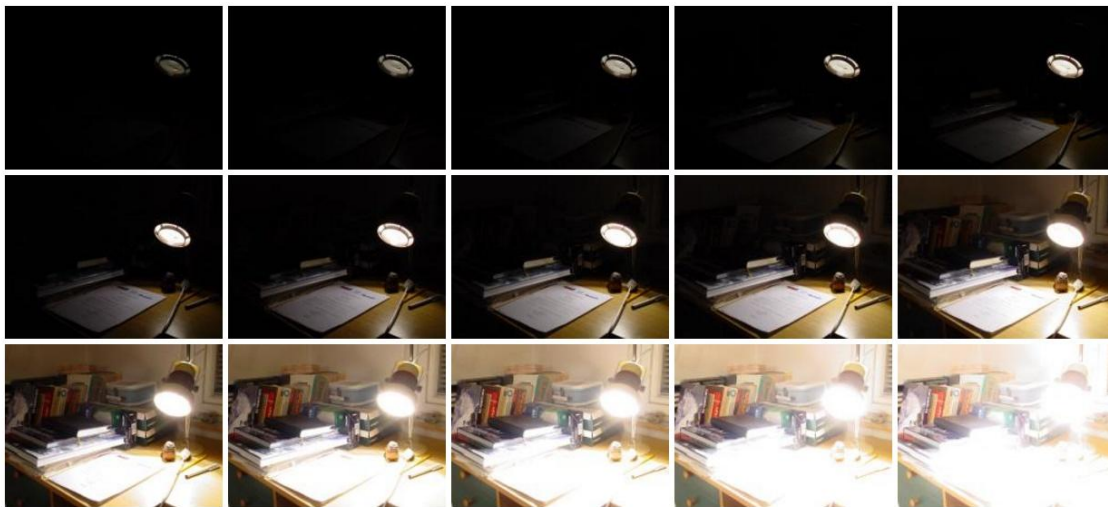


3.30 Načtení a uložení HDR radianční mapy, uložení obrázků a Reset.

V části **Práce se souborem** lze i načíst již vytvořenou radianční mapu pomocí tlačítka **Načti HDR**, uloženou ve formátu RGBE. Vytvořená radianční mapa zde může být uložena ve formátu RGBE pomocí tlačítka **Ulož *.hdr**. Po vytvoření fotografií a histogramů lze vybrat obrázek k uložení a uložit pomocí tlačítka **Ulož obrázek**. Tato část obsahuje i tlačítko **Reset**, který program vyčistí všechny globální proměnné a nastaví program HDR_lab do 1. pozice načtení obrázků.

3.4 Výsledky použitých postupů

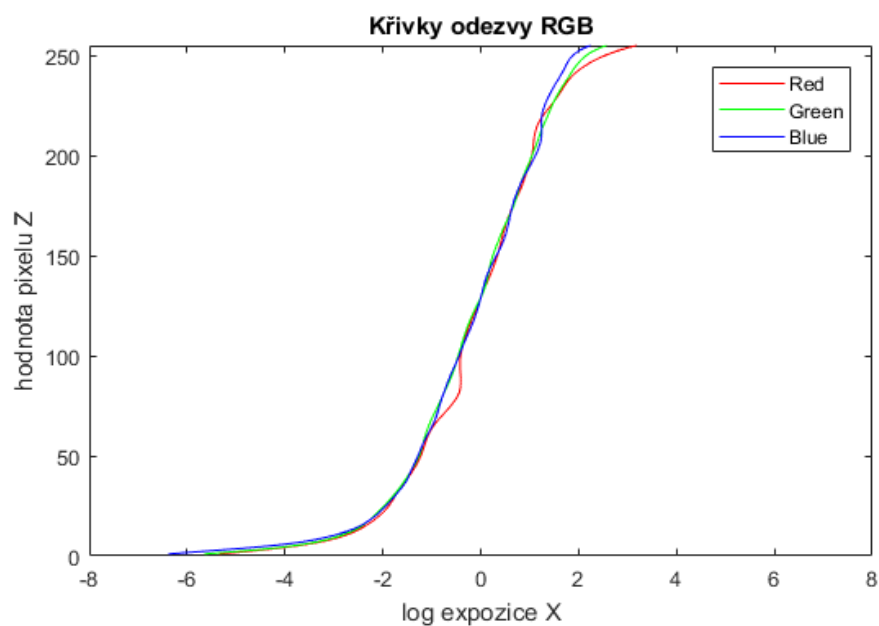
Vstupní snímky.



Obrázek 3.31 Obrázky s rozdílnou expozicí převzaty ze stránek <http://cadik.posvete.cz/tmo/> [9].

Velikost snímků ponechána 1600 x 1200 pixelu.

Vytvoření křivek odezvy RGB a radianční mapy.



Obrázek 3.32 Křivky odezvy RGB pro vstupní snímky při použití hladkost = 20.



Obrázek 3.33 Radianční mapa vytvořena z vstupních snímků

Maximální hodnota Radianční mapy je 1775.8737 a minimální hodnota je 0.02387.

Globální metody

Jednoduchá globální metoda logaritmizace.

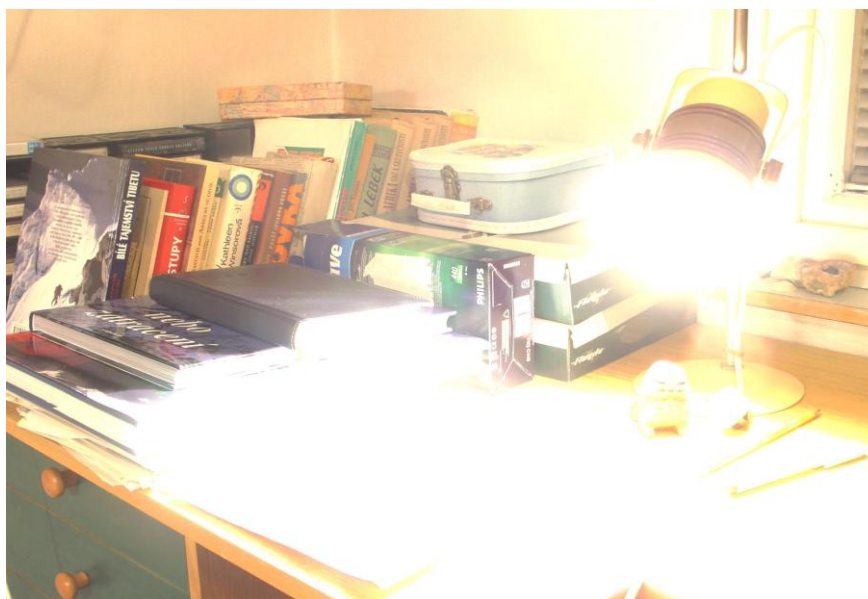
Po zlogaritmování je maximální hodnota 7.482 a minimální hodnota -3.7349. Posuvník **Posuv hodnot** nastaven na hodnotu 0.



Obrázek 3.34 Globální metoda pomocí logaritmizace.

Jednoduchá globální metoda pomocí druhé odmocniny.

Po odmocnění je maximální hodnota 42.1411 a minimální hodnota 0.15452. Posuvník **Posuv hodnot** nastaven na hodnotu 0.



Obrázek 3.35 Globální metoda pomocí druhé odmocniny.

Jednoduchá globální metoda změny rozsahu na hodnotu [0,1].

Po změně rozsahu je maximální hodnota 0.99944 a minimální hodnota 0.02332. Posuvník **Posuv hodnot** nastaven na hodnotu 0.



Obrázek 3.36 Globální metoda změny rozsahu

Globální metoda Optimalizace.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 255 a minimální hodnota 0. Posuvník Hodnota **Alpha** nastavena na hodnotu 0.27.



Obrázek 3.37 Globální metoda Optimalizace

Metoda Reinhard global.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 1 a minimální hodnota 0.023649. Posuvník hodnoty **Jas** nastaven na hodnotu 1 a posuvník hodnoty **Kontrast** nastaven na hodnotu 0.497.



Obrázek 3.38 Globální metoda Reinhard global

Adaptivní logaritmické mapování Drago.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 1.3274 a minimální hodnota 0.031043. Posuvník hodnoty **Zkreslení** nastaven na hodnotu 0.85 a posuvník hodnoty **Gamma** nastaven na hodnotu 2.2.

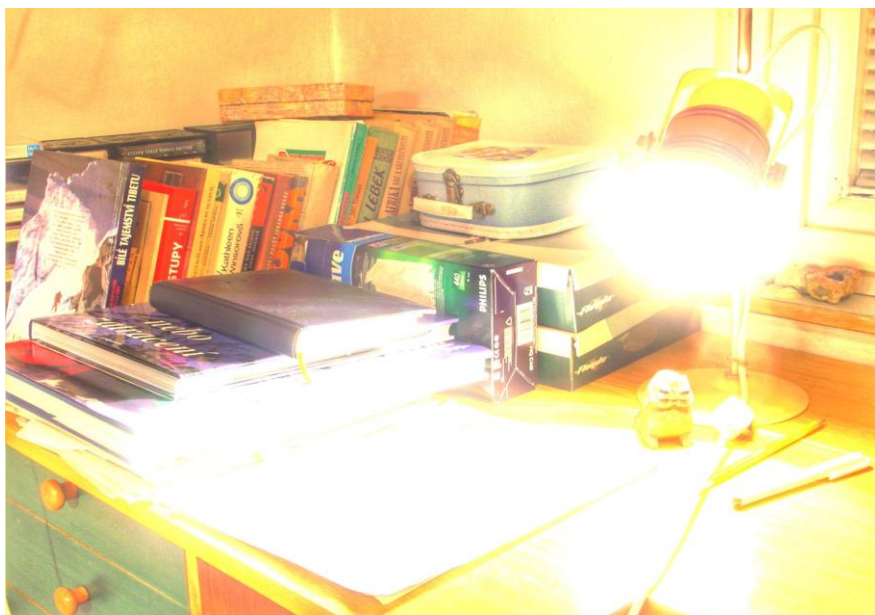


Obrázek 3.39 Adaptivní logaritmické mapování Drago

Lokální metody

Lokální metoda Fattal.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 44.2396 a minimální hodnota 0.068433. Posuvník hodnoty **Alpha** nastaven na hodnotu 0.1 a posuvník hodnoty **Beta** nastaven na hodnotu 0.95.



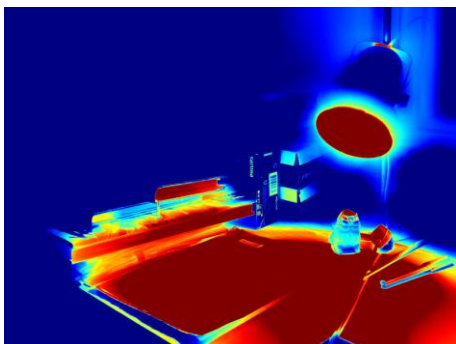
Obrázek 3.40 Lokální metoda Fattal

Lokální metoda Durand.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 2.3263 a minimální hodnota 0.006831. Posuvník hodnoty **Kontrast** nastaven na hodnotu 15.



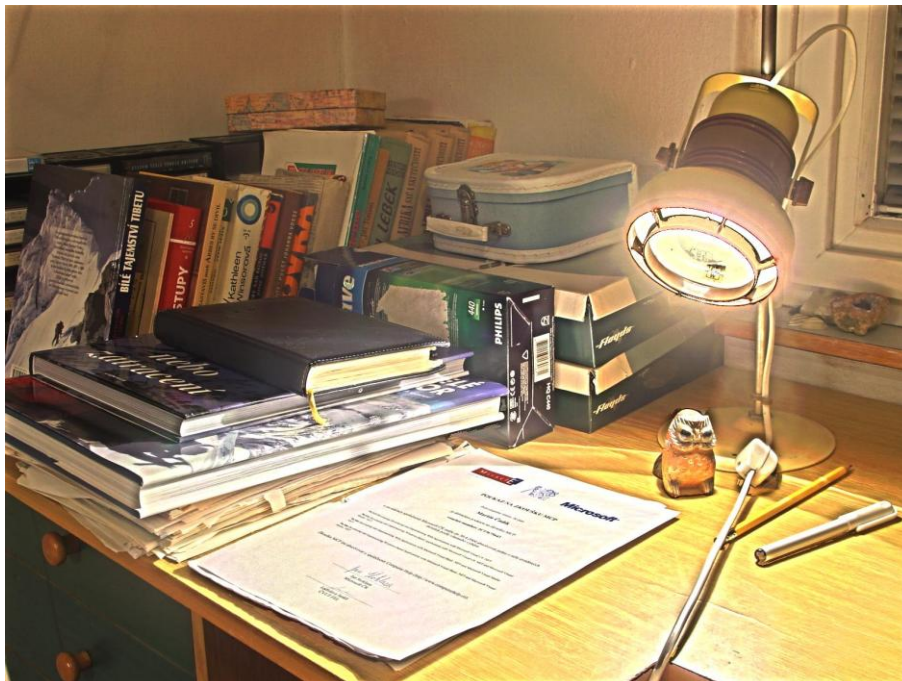
Obrázek 3.41 Lokální metoda Durand



Obrázek 3.42 Základní vrstva a vrstva detailů metody Durand

Metoda Reinhard local.

Po změně rozsahu je maximální hodnota 1 a minimální hodnota 0.025229. Posuvník hodnoty **Saturace** nastaven na hodnotu 0.72. Posuvník hodnoty **Eps-prahová hodnota** nastaven na hodnotu 0.8. Posuvník hodnoty **Phi - ostření** nastaven na hodnotu 0.



Obrázek 3.43 Metoda Reinhard local

V části implementace bylo představeno laboratorní pracoviště s vysokým dynamickým rozsahem. Ke snímání se využívá digitální zrcadlovka Nikon D3200 propojená s počítačem pomocí programu qDslrDashboard. Vytvořené obrázky s rozdílnou expozicí se dále načtou do popsaného programu HDR_lab vytvořeného pomocí programu Matlab. Využilo se jednoho řádku červeného kanálu, na který se použily užití metody. Vzhledem ke kombinované formě studia, omezeného časového přístupu do laboratoří a většímu počtu fotografií byly v další části využity fotografie ze stránek <http://cadik.posvete.cz/tmo/>[9]. Upravené fotografie pomocí programu HDR_lab jsou zobrazeny v části 3.4.

4 ZÁVĚR

Bakalářská práce Snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem seznamuje s problematikou snímání HDR (High dynamic range) obrazu.

V první části se zaměřila na nalezení prostředků k vytvoření HDR snímku za pomoci skládání z několika snímků s nízkou dynamikou intenzity. Za pomoci fotoaparátu Nikon D3200 propojeného s počítačem prostřednictvím programu qDslrDashboard se vytvoří série fotografií s rozdílnou expozicí. Byla vytvořena umělá laboratorní scéna s vysokým dynamickým rozsahem, která obsahuje samotný zdroj světla. V programu Matlab byl vytvořen program HDR_lab, kde pro skládání snímků s nízkou dynamikou byla využita metoda Debevec&Malik [15] na vytvoření radianční mapy, která vznikla spojením všech nasnímaných snímků a křivek odezvy fotoaparátu za pomoci rovnice 1.19. Takto vzniklá mapa se dá uložit do konvenčního formátu RGBE pro HDR *.hdr. Nejznámější formáty byly popsány v poslední části první kapitoly.

V druhé části se práce zabývá komprimačním převodem HDR do obrazu s nízkým dynamickým rozsahem pro zobrazení na běžných zobrazovačích. Popisuje principy tzv. tone-mappingu. Blíže se věnuje několika globálním operátorům (jednoduché operátory log, sqrt, změna rozsahu, optimalizace, Reinhardův globální operátor, Adaptivní logaritmické mapování metody Drago) a několika lokálními metodami (Metoda Fattal - Gradientní doménová komprese, Metoda Durand - Bilaterální filtrování a Reinhardův lokální operátor).

V třetí části se práce zabývá samotnou implementací ve vytvořeném programovém prostředí HDR_lab. Popisuje postup při práci s vytvořeným programem. Jsou vytvořeny rozdílné snímky několika metod pro snížení dynamického rozsahu.

Přínosem této práce je vytvoření uceleného náhledu na problematiku snímání a tvorby HDR snímku a jeho následné komprimace za pomoci tone-mapping operátorů. Prostor pro další rozvoj této práce se nabízí v několika směrech. Dalším krokem by mohlo být zrychlení řešení použití Poissonovy rovnice, která je početně nejnáročnějším krokem metody Fattal – metoda gradientní komprese. Další zaměření by mělo patřit vytvoření HDR videa za pomoci několika snímacích čipů, pomoci úprav křivek nebo pomoci funkce time-lapse, úpravy jednotlivých snímků do HDR a následné propojení do videosekvence.

LITERATURA

- [1] *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB* [online]. 1996 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>
- [2] ADAMS, Ansel. *The Camera*. 5th ed. New York: Little, Brown, 1998. 203 p. ISBN 0-8212-2184-1.
- [3] AGGARWAL, M. a N. AHUJA. High dynamic range panoramic imaging. *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001* [online]. IEEE Comput. Soc, 2001, June 11, 2008, : 2-9 [cit. 2015-12-10]. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937492. ISBN 0-7695-1143-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=937492>
- [4] Arati N. Joshi , Prof S. P. Deshmukh. A Comparison and Study of Tone Mapping Methods for High Dynamic Range Images. *IJIREEICE* [online]. 2016, **Issue 6**(Vol. 4), 5 [cit. 2017-04-27]. ISSN (Online) 2321 – 2004. Dostupné z: <http://www.ijireeice.com/upload/2016/june-16/IJIREEICE%2045.pdf>
- [5] ASHIKHMIN, Michael. *13th Eurographics Workshop on Rendering - A tone mapping algorithm for high contrast images: Pisa, Italy, June 26-28, 2002*. New York: Association for Computing Machinery, c2002, 336 s. ISBN 15-811-3534-3. Dostupné také z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.18.7977>
- [6] BLOCH, Christian. *HDRI pro fotografy a počítačové grafiky: High Dynamics Range Imaging = zobrazení vysokého dynamického rozsahu*. Vyd. 1. Brno: Zoner Press, 2008, 348 s. Encyklopedie - grafika a fotografie. ISBN 978-80-7413-001-4.
- [7] BOČÍK, Andrej. *Velká kniha HDR fotografie: kouzlo fotografií s vysokým dynamickým rozsahem*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2011, 224 s. ISBN 978-80-251-3367-5. BALANIS, C.A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, xvii, 1117 s. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [8] Burda, K., Stražil, I., *Zabezpečovací systémy*. Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [9] ČADÍK, M. Evaluation of Tone Mapping Operators. [Online] [Cit. 14. května 2015] Dostupné na www: <http://cadik.posvete.cz/tmo/>.
- [10] DAVIS, Harold L. *Expozice a světlo v digitální fotografii*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2008, 176 s. Edice digitální fotografie. ISBN 978-80-251-2208-2.
- [11] Debevec, P.E., Malik, J., *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs* [online]. 1997, [cit. 16. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>
- [12] Drago F., Myszkowski K., Annen T., Chiba N.: *Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes*. Eurographics, 2003 [cit. 2016-05-11]. Dostupný na URL: <<http://www.mpi-inf.mpg.de/resources/tmo/logmap/logmap.pdf>>. New York, New York, USA: ACM Press, 2003, **22**(3), s. 419-426 [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1111/1467-8659.00689. ISBN 1581135211. ISSN 0167-7055. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.18.7977&rep=rep1&type=pdf>
- [13] DURAND, Frédo a Julie DORSEY. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *ACM Transactions on Graphics* [online]. **21**(3): - [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1145/566654.566574. ISSN 07300301. Dostupné z:

- <https://people.csail.mit.edu/fredo/PUBLI/Siggraph2002/DurandBilateral.pdf>
- [14] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, W. Heidrich, and K. Myszkowski. High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting. CA: Morgan Kaufmann, 2010.
 - [15] Erik Reinhard and Kate Devlin, 'Dynamic Range Reduction Inspired by Photoreceptor Physiology', IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 11(1), Jan/Feb 2005.
 - [16] FATTAL, Raanan, Dani LISCHINSKI a Michael WERMAN. Gradient domain high dynamic range compression. *ACM Transactions on Graphics* [online]. **21**(3): - [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1145/566654.566573. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://www.cs.huji.ac.il/~danix/hdr/hdrc.pdf>
 - [17] Gallery of Reference Tone Mapped Images. In: DRAGO, Frédéric. *Gallery of Reference Tone Mapped Images* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://resources.mpi-inf.mpg.de/tmo/NewExperiment/TmoOverview.html>
 - [18] *HDR Toolbox is a MATLAB/Octave toolbox for processing High Dynamic Range (HDR) content.* [online]. Natick, MA, USA: AK Peters (CRC Press), 2011 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: https://github.com/banterle/HDR_Toolbox
 - [19] Holzer, B.: *High Dynamic Range Image Formats.* [cit. 2016-12-11]. Dostupný na URL: <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2006/Holzer-06-HDR/Holzer-06-HDR-.pdf>
 - [20] K. Kirk and H. J. Andersen. Noise characterization of weighting schemes for combination of multiple exposures. In British Machine Vision Conference, volume 3, pages 1129{1138, 2006.
 - [21] Kimmo Roimela, Tomi Aarnio, Joonas Itäranta: High Dynamic Range Texture Compression, Nokia Research Center, 2006
 - [22] KOCICH, P. *Zpracování obrazových dat s velkým dynamickým rozsahem. Brno, 2009, 60 s. Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Fakulta Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Petyovský.* [online]. [cit. 2015-12-07].
 - [23] KUŽELKA, Karel. *PRŮZKUM MOŽNOSTÍ A TVORBA HDR (HIGH DYNAMIC RANGE) SNÍMKŮ* [online]. Praha, 2012 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2012/karel-kuzelka-dp-2012.pdf>. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
 - [24] KUŽELKA, Karel. *PRŮZKUM MOŽNOSTÍ A TVORBA HDR (HIGH DYNAMIC RANGE) SNÍMKŮ* [online]. Praha, 2012 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2012/karel-kuzelka-dp-2012.pdf>. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
 - [25] LARSON, G.W., H. RUSHMEIER a C. PIATKO. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* [online]. **3**(4): 291-306 [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1109/2945.646233. ISSN 10772626. Dostupné z: <http://cs-www.cs.yale.edu/c2/images/uploads/HR3pdf.pdf>
 - [26] M. Granados, B. Ajdin, M. Wand, C. Theobalt, H.-P. Seidl, and H. P. A. Lensch. Optimal HDR reconstruction with linear digital cameras. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 1, pages 215{222, 2010.
 - [27] M. Robertson, S. Borman, and R. Stevenson. Estimation-theoretic approach to dynamic range improvement using multiple exposures. *Journal of Electronic Imaging*,

- 12(2):219{228, 2003.
- [28] *Matlab-gui* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
 - [29] NAYAR, S.K. a T. MITSUNAGA. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures. *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No.PR00662)* [online]. IEEE Comput. Soc, 2000, : 472-479 [cit. 2015-12-10]. DOI: 10.1109/CVPR.2000.855857. ISBN 0-7695-0662-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=855857>
 - [30] Nikon D3200. [Http://www.nikon.cz/](http://www.nikon.cz/) [online]. Europe: Nikon Europe B.V, 2015, 2015 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: http://www.nikon.cz/cs_CZ/product/digital-cameras/slr/consumer/d3200.
 - [31] Patrick Perez, Michel Gangnet, and Andrew Blake. Poisson image editing. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 22(3):313–318, 2003.
 - [32] PIHAN, Roman. Vše o formátu RAW. *Vše o formátu RAW – 1.díl* [online]. 2008, 19.3.2008 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/vse-o-formatu-raw-1dil/2182>
 - [33] *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 1996 [cit. 2015-12-10]. ISBN 0-7803-2988-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=506947>
 - [34] *QDslrDashboard* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://dslrdashboard.info>
 - [35] R. K. Mantiuk, K. Myszkowski and H.-P. Seidel *High Dynamic Range Imaging*. [cit. 2016-04-18]. Dostupný na URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/mantiuk15hdri.pdf>
 - [36] REINHARD, Erik, Michael STARK, Peter SHIRLEY a James FERWERDA. Photographic tone reproduction for digital images. In: *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '02* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2002, s. 267- [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1145/566570.566575. ISBN 1581135211. ISSN 07300301. Dostupné z: http://www.cmap.polytechnique.fr/~peyre/cours/x2005signal/hdr_photographic.pdf
 - [37] S. Mann and R. W. Pickard. Extending dynamic range by combining different exposed pictures. In *IS&T Annual Conference*, pages 442{448, 1995.
 - [38] Seetzen, H., Whitehead, L. A., and Ward, G. 54.2: A high dynamic range display using low and high resolution modulators. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 34, 1 (2003), 1450–1453.
 - [39] Sony develops back-illuminated CMOS image sensor, realizing high picture quality, nearly twofold sensitivity(*1) and low noise. *Sony develops back-illuminated CMOS image sensor, realizing high picture quality, nearly twofold sensitivity(*1) and low noise* [online]. 2008, June 11, 2008 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/index.html>
 - [40] T. Mitsunaga and S. K. Nayar. Radiometric self calibration. In *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pages 1374{1380, 1999.
 - [41] TUMBLIN, J. a H. RUSHMEIER. Tone reproduction for realistic images. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* [online]. 1993, 13(6), s. 42-48 [cit. 2015-12-15]. DOI: 10.1109/38.252554. ISSN 0272-1716. Dostupné z: https://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/classes/cs294-appearance_models/sp2001/cache/tumblin93.pdf
 - [42] Vančura Jan: Tone-mapping HDR obrazů, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2010

- [43] Y. Tsin, V. Ramesh, and T. Kanade. Statistical calibration of the CCD imaging process. In IEEE International Conference on Computer Vision, pages 480{487, 2001.
- [44] ZAPRYANOV, Georgi. Automatic White Balance Algorithms –a New Methodologyfor Objective Evaluation. *International Scientific Conference Computer Science'2015* [online]. (2015) [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://www.acad.bg/rismim/itc/sub/archiv/Paper3_1_2012.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

k	Kontrastní poměr.
K_X	Koeficient aktuálního snímku.
T_X	Expoziční čas aktuálního snímku.
T_{MAX}	Největší expoziční čas všech snímků.
x_i	Vážený průměr hodnot.
f^{-1}	Inverzní funkce fotoaparátu.
v_i	Digitální hodnota získaná z čipu odpovídající dopadajícímu světlu.
t_i	Doba expozice i-tého bodu.
w	Váhová funkce.
v_{min} a v_{max}	Extrémní hodnoty.
N	Vzorek pixelů pro metodu Debevec a Malik.
Z_{min} a Z_{max}	Maximální hodnoty pixelů.
E_i	Intenzita jasů pixelu.
Δt_j	Doba trvání expozice.
Z_{ij}	Hodnota pixelu.
g	Logaritmus inverzní funkce odezvy fotoaparátu.
λ	Skálar pro úpravu množství šumu v měření.
P	Počet fotografií.
I_{in}	Vstupní jas pixelu.
I_{out}	Výstupní jas pixelu.
D	Rozsah intenzity zobrazovacího zařízení.
τ	Hodnota k doladění obrazu v metodě optimalizace.
α	Hodnota měněná uživatelem k doladění obrazu v metodě optimalizace.
$L_W(x,y)$	Počáteční jas pro každý pixel.
N	Počet pixelů v obraze.
δ	Minimální hodnota, která je nutně použita pokud je v obraze obsažena černá (hodnota 0).
a	Hodnota pro ruční změnu expozice $a = 0.18$.
L_{white}	Nejmenší jas mapující čistou bílou.
V_i	Odezva na gaussovske rozostření.
V_1	Práh V nezávislý na absolutní hodnotě jasu.
V_2	Surround.

a	Hodnota klíče.
Φ	Parametr ostření.
ϵ	Prahová hodnota.
L_d	Jas displeje.
m	Parametr měnící kontrast.
f	Parametr měnící intenzitu.
k	Klíč použitý v reinhardově globálním operátoru.
I_{av}	Průměrná hodnota intenzity.
L_{dmax}	Měřítka rozsahu pro zamýšlené zobrazení metody Drago.
b	Parametr nastavující kompresi vysokých hodnot a zobrazení detailů v tmavých oblastech.
γ	Koeficient gradačního zkreslení (gamma).
$H(x)$	Logaritmus jasu.
$\Phi(x)$	Prostorově variantní tlumící funkce.
$H'(x)$	Derivace logaritmu jasu.
$G(x)$	Funkce závislá na derivaci jasu $H'(x)$ a tlumící funkci $\Phi(x)$.
∇^2	Laplaceův operátor.
$divG$	Divergence vektorového pole.
H_k	Gaussova pyramida.
k	Počet úrovní Gaussovy pyramidy.
α	Parametr určuje hladinu, nad kterou jsou gradienty ztlumovány.
β	Parametr určuje míru ztlumení.
I	Intenzita každého pixelu.
g	Funkce pro zastavení šíření tepla přes hrany.
σ	Měřítka intenzity.
s	Pixel.
t	Časový krok.
$neighb_4(s)$	4 sousedící pixely s pixelem s .
λ	Skalár, který určuje rychlost difuze.
Ω	Celý obraz.
ρ	Norma chyby (např. kvadratická).
ψ	Derivace ρ .
$k(s)$	Normalizační člen.

HDR	High dynamic range, vysoký dynamický rozsah.
HDRI	High dynamic range image, obraz s vysokým dynamickým rozsahem.
LDR	Low dynamic range, nízký dynamický rozsah.
SVE	Spatially Varying Exposure, prostorově proměnlivá expozice.
LV	Light Value, světelná hodnota.
EV	Exposure Value, expoziční hodnota.
AEB	Automatic Exposition Bracketing, automatický expoziční bracketing.
RAW	Soubor nezpracovaných dat ze snímače.
SNR	Odstup signálu a šumu.
RGBE	Kódování formátu HDR.
XYZE	Kódování formátu HDR.
ILM	Industrial Light & Magic.
OpenEXR	Formát pro kódování snímku s vysokým dynamickým rozsahem.
LCD	Displej využívající technologii tekutých krystalů.
LED	Light Emitting Diode – světlocitlivá dioda.
FFT	Rychlá furrierova transformace.
USB	Universal Serial Bus.

A PROGRAM HDR_LAB

A.1 Obsah CD.

HDR_lab:

bilateralFilter.m	/ Vytvoření bilaterálního filtru
BilateralSeparation.m	/ Rozdělení na vrstvy Base a Detail
FattalPhi.m	/ Mapování pomocí gradientní doménové komprese
FattalTMO.m	/ Metoda Fattal se vstupními proměnnými
float2RGBE.m	/ Převod do formátu RGBE
HDR_lab.fig	/ Figure programu HDR_lab
HDR_lab.m	/ Program HDR_lab s použitými funkcemi
ChangeLuminance.m	/ Změna luminance pro metodu Fattal
loadimag.m	/ Načtení a seřazení fotografií
PoissonSolver.m	/ Řešení poissonovy rovnice pro metodu Fattal
read_rgbe.m	/ Načtení *.hdr
RemoveSpecials .m	/ Odstranění Inf a NaN
RGBE2float.m	/ Převod z formátu RGBE
write_rgbe.m	/ Zápis *.hdr
write_rgbe_line.m	/ Pomocný soubor k write_rgbe.m

BP89136KUPKA.pdf / Bakalářská práce

obsahcd.txt / obsah cd